FELIX · QUI · POTUIT · RERUM · COGNOSCERE · CAUSAS
ARTHUR · ULDERIC · DESJARDINS

CANCELED

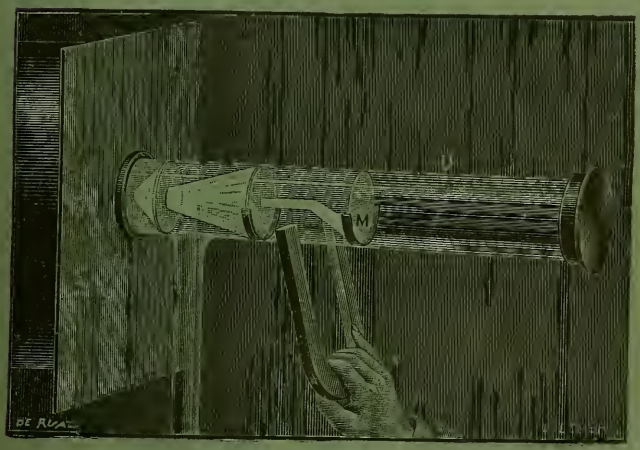
LES RADIATIONS NOUVELLES.

LES RAYONS X

ET LA PHOTOGRAPHIE A TRAVERS LES CORPS OPAQUES,

PAR

Ch.-Ed. GUILLAUME.
DOCTEUR ÈS SCIENCES,
ADJOINT AU BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES.



PARIS,
GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES,
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1896

a Monsieur le Liante,
Membre de l'Institut,
Gueri les miennes complices
de l'auteur.

LES RAYONS X

ET LA PHOTOGRAPHIE

A TRAVERS LES CORPS OPAQUES.

5214 B. — PARIS, IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS,
55, quai des Grands-Augustins.

Valeur déclarée
Deux cents francs
Monsieur Röntgen
Würtzbourg

LES RAPPORTS ENTRE LES

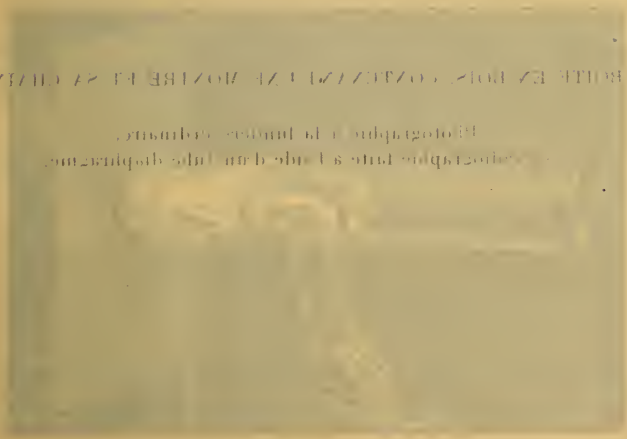
RAYONS X

ET LA PHOTOGRAPHIE

A TRAVERS LES CORPS OPAQUES

PAR

M. A. BOUCHARDAT



PARIS

Épreuve de MM. Benoist et Hautevoesne. Autotype.

BOITE EN BOIS, CONTENANT UNE MONTRE ET SA CHAINE.

Photographie à la lumière ordinaire,
et radiographie faite à l'aide d'un tube diaphragmé.

Épreuve de MM. Benoist et Hurmuzescu. *Frontispice.*

LES RADIATIONS NOUVELLES.

LES

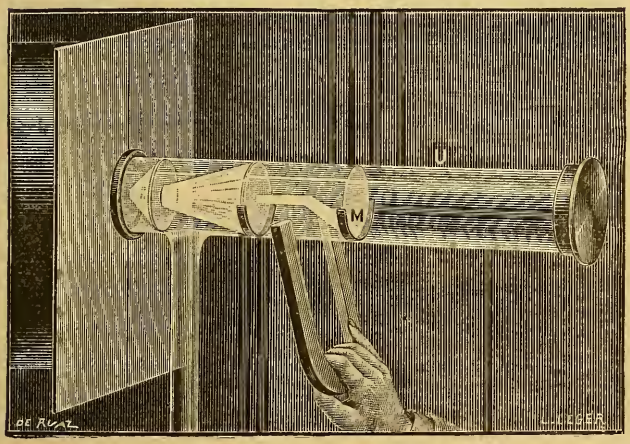
RAYONS X

ET LA PHOTOGRAPHIE A TRAVERS LES CORPS OPAQUES,

PAR

Ch.-Ed. GUILLAUME.

41/10-13



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES,

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1896

(Tous droits réservés.)

HARVARD UNIVERSITY
SCHOOL OF MEDICINE AND PUBLIC HEALTH
LIBRARY

13 NOV 1956
Gift: Dr. A.U. Desjardins

PRÉFACE.

La merveilleuse découverte du professeur Röntgen, dont on a tant parlé depuis quelque temps, donne la sanction d'une application pratique à un important ensemble de recherches commencées il y a plus d'un quart de siècle, et autour desquelles on s'est livré, depuis quelques années surtout, d'homériques combats. L'interprétation toute matérielle donnée par M. Crookes des phénomènes découverts par Hittorf devint rapidement populaire; pour la première fois, la théorie cinétique des gaz était prise sur le fait, dans une de ses conséquences qui semblait évidente. Cependant, la critique ne se fit pas attendre; M. Goldstein, connu déjà par de belles recherches sur le phénomène cathodique, combattit les idées de M. Crookes par la théorie cinétique elle-même, et donna des arguments, en apparence irréfutables, contre l'idée d'un bombardement moléculaire. Et, malgré tout, cette idée s'appliquait si bien à une partie du phénomène, il était si difficile de la remplacer, que le bombardement survécut à toutes les impossibilités.

Pourtant, les attaques venaient de haut; l'illustre et regretté Hertz, MM. E. Wiedemann et H. Ebert, M. Jaumann, surtout M. Lenard, amoncelèrent les difficultés autour de la théorie du bombardement, que défendirent des champions tels que Lord Kelvin, le professeur J.-J. Thomson et le professeur Fitzgerald. Il y eut, autour de cette question, comme une lutte nationale, entre d'éminents représentants des pays où les deux opinions possibles concernant le phénomène avaient vu le jour. C'est surtout après les magnifiques recherches de M. Lenard, véritable précurseur de M. Röntgen, que la lutte s'anima. Le jeune physicien, alors préparateur de Hertz, avait vu le double phénomène dans le tube et hors du tube. Il l'avait scindé par l'expérience. Il aurait précédé M. Röntgen dans les applications, si la séparation s'était faite aussi dans son esprit. Le propre des résultats mis au jour par M. Lenard est de s'adapter, pour une part, aussi bien que possible aux idées de M. Crookes, tandis que, dans leur ensemble, ils leur sont franchement opposés.

L'idée qui semble s'imposer aujourd'hui, c'est que le phénomène se compose de deux parties absolument distinctes; l'une est une conséquence de l'autre, mais elles sont essentiellement différentes de leur nature; c'est seulement depuis que cette idée s'est fait jour que l'on entrevoit la possibilité de tout expliquer sans avoir recours à des notions entièrement nouvelles.

Je me suis proposé d'exposer, dans cet opuscule, une partie des recherches qui ont conduit à la découverte du

professeur Röntgen. L'étude des décharges dans les gaz forme déjà un ensemble fort important, qu'il serait téméraire de vouloir exposer dans tous ses détails; je me contenterai d'en marquer les étapes, en insistant particulièrement sur les phénomènes qui peuvent servir de pierre de touche à la théorie.

Il m'a paru intéressant de rapprocher du phénomène spécial qui nous occupe un certain nombre de faits singuliers et peu connus, qui présentent, avec plusieurs particularités de la décharge dans les gaz ou avec les propriétés de la radiation découverte par le professeur Röntgen, une parenté évidente. Ces faits, avec les théories qui les relient, sont exposés dans la première Partie de l'Ouvrage. La seconde Partie est ainsi débarrassée de tous les phénomènes contingents et débute au cœur du sujet. A mesure que nous avançons dans l'étude de la décharge dans les gaz, exposée dans les Chapitres IV et V, la découverte de M. Röntgen devient plus nette entre les lignes, jusqu'au moment où le hasard la dévoile à un physicien heureux et perspicace, qui a su l'extraire d'un ensemble compliqué de phénomènes.

Jusqu'à ce moment, l'apport de la Physique française est restreint ; à peine trouvera-t-on de loin en loin, depuis les anciennes recherches d'Abria et de Masson, une étude ayant trait au sujet qui nous occupe. Après la publication du Mémoire de M. Röntgen, l'indifférence fait place à l'intérêt le plus vif. De toutes parts on se met à l'œuvre; on perfectionne la technique expérimentale, on applique les

nouvelles radiations aux études les plus diverses; on cherche à fixer les règles d'emploi des tubes, sur lesquelles nous avons tenu à insister particulièrement. Puis, soudain, se révèle la grande importance des substances phosphorescentes. Liées d'abord, pour le renforcement des radiations, aux rayons découverts par M. Röntgen, elles s'en dégagent comme par enchantement; une nouvelle découverte prend la place de celle qui vient d'être accueillie avec un si grand enthousiasme et qui n'en formera désormais qu'un cas particulier.

En quelques semaines, la Physique française a regagné le temps perdu; elle paie sa dette au trésor commun et l'augmente d'un gros intérêt.

Pavillon de Breteuil, Sèvres, mars 1896.

LES RAYONS X

ET LA PHOTOGRAPHIE

A TRAVERS LES CORPS OPAQUES.

PREMIÈRE PARTIE.

CHAPITRE I.

L'ÉTAT GAZEUX.

1. Théorie cinétique. — Le pouvoir d'expansion des gaz était attribué autrefois aux forces répulsives des molécules. Mais, l'expérience ayant montré que la détente d'un gaz dans un espace clos n'élève pas sensiblement sa température, il devint évident, le principe de l'équivalence entre la chaleur et le travail une fois admis, que la répulsion ne pouvait pas être une propriété essentielle des corps à l'état gazeux. On revint alors à une idée émise déjà par Jacques Bernoulli, et l'on fonda, sur une base mathématique solide, la théorie cinétique des gaz.

Cette théorie ne fut point adoptée sans une vive résistance. Elle conduisait, en effet, à attribuer aux corpuscules de la matière gazeuse des vitesses de translation qui parurent d'abord invraisemblables. Aux températures ordinaires, les molécules des gaz de l'air devaient posséder la vitesse d'une balle de fusil, et l'on s'expliquait mal que,

dans un air tranquille, une fumée légère mît un temps aussi long à se dissiper ; que la diffusion de la matière et de la chaleur fût si lente dans les gaz ; qu'en un mot, tout se passât presque comme si les molécules étaient en repos.

La théorie enseignait de plus que les vitesses sont proportionnelles à la racine carrée de la température, comptée à partir du zéro absolu, et inversement proportionnelles à la densité des gaz. On en concluait que, dans les flammes, les molécules d'hydrogène devaient atteindre parfois des vitesses de 4 ou 5 kilomètres par seconde, et devenir de véritables projectiles capables d'un certain effet destructeur.

On pensa un instant que la théorie succomberait sous ses propres conséquences. Elle n'en fut que plus rapide à se développer, car ses promoteurs, ayant à répondre à de multiples objections, en firent l'objet constant de leurs investigations.

Les critiques furent bientôt réfutées par de bons arguments.

Si, dans une atmosphère ne possédant pas de mouvement d'ensemble, la diffusion se fait avec une extrême lenteur, c'est parce que les molécules sont sans cesse arrêtées dans leur course, renvoyées dans toutes les directions, et ne parcourent des trajectoires rectilignes que sur des longueurs de l'ordre du dixième de micron.

C'est après une quantité innombrable de chocs qu'une particule de matière gazeuse traverse une couche d'une certaine épaisseur, et le mélange parfait de deux gaz, s'il n'est pas favorisé par des forces agissant dans un sens précis, exige en général un temps très long. D'ailleurs, les lois de la diffusion qu'a révélées l'expérience sont bien d'accord avec les résultats de l'investigation mathé-

matique, dans laquelle on n'envisage que la probabilité des mouvements dans tous les sens.

La théorie cinétique des gaz a été développée surtout par le grand physicien Clausius. La loi mathématique de la répartition des vitesses entre les molécules en est un élément des plus importants. Cette loi a été donnée par l'illustre Maxwell. Elle dérive de celle que Laplace avait trouvée pour la répartition des écarts d'une valeur moyenne; mais, tandis que la loi de Laplace se rapporte aux phénomènes symétriques, dans lesquels la probabilité des écarts est la même dans le sens positif et dans le sens négatif, celle de Maxwell est dissymétrique, puisque, les vitesses étant prises en valeur absolue sans intervention de la direction du mouvement, sont limitées d'une part à une valeur nulle, tandis que, de l'autre côté, elles peuvent s'étendre jusqu'à l'infini. Comme la loi de Laplace, celle de Maxwell contient une exponentielle, mais elle possède un facteur qui l'annule pour une valeur nulle de la variable, qui est la vitesse [1].

Nous insistons encore sur ce fait, que la loi de Maxwell, comme toutes celles qui en dérivent immédiatement, est fondée sur l'idée que la masse gazeuse ne possède aucune force directrice, que les molécules sont entièrement abandonnées à elles-mêmes, que rien ne tend soit à activer, soit à retarder leur mélange (**18** et **19**).

2. La Molécule et l'Atome. — Nous ne discuterons point l'existence de la molécule, dernière subdivision de la matière dont s'occupe la Physique ; nous ne chercherons pas

---

[1] L'expression de la loi de Maxwell est la suivante :

$$y = C x^2 e^{-x^2}.$$

y est le nombre relatif de molécules possédant la vitesse x, C une constante.

davantage à démontrer que cette molécule est un conglomérat dont le lien peut être brisé par des procédés particuliers. Ce sont des faits que l'on cherchera à établir ou à combattre dans un ouvrage de doctrine. Nous les accepterons comme l'expression la plus probable et certainement la plus commode de l'ensemble des phénomènes physico-chimiques.

Il ne sera pas inutile, peut-être, de remarquer en passant qu'en général la Physique mathématique s'occupe peu de la molécule. L'élément différentiel, que l'on considère comme infiniment petit dans les fondements du Calcul, ne l'est pas en Physique mathématique. Cet élément doit posséder toutes les propriétés de l'ensemble du corps auquel il se rapporte. Il est délimité par des surfaces planes qui se coupent suivant des arêtes vives. Mais il ne possède approximativement cette propriété que s'il contient un nombre de molécules assez grand pour que tous les éléments soient semblables et que la molécule elle-même y puisse être considérée comme négligeable en grandeur.

Les lois qui régissent la matière ne sont généralement vraies que sur un ensemble où la molécule disparaît individuellement. Lorsqu'elle intervient comme élément isolé, les lois sont modifiées et ne sont plus contenues dans la formule établie pour l'ensemble.

Par exemple, l'équation caractéristique des gaz ne nous dit rien de ce qui se passe à la limite d'une atmosphère; là où la molécule possède un haut degré de liberté, là où le chemin moyen entre deux chocs devient une longueur mesurable, aucune formule exacte pour l'ensemble n'est susceptible d'indiquer, même approximativement, ce qui va se passer.

C'est en voulant appliquer ces formules que l'on est arrivé à d'inextricables difficultés, lorsqu'on a cherché à

expliquer la conservation des atmosphères. Dans la théorie cinétique, nous considérons la molécule isolée. Si elle est animée d'une vitesse de bas en haut, elle s'éloigne de l'astre auquel elle appartient, pour retomber lorsque sa vitesse est épuisée. Si l'astre est petit, la vitesse grande, la molécule s'éloigne et ne revient plus. C'est pourquoi les corpuscules célestes sont dépourvus d'atmosphère, tandis que les astres de plus forte dimension en sont entourés. Les gaz dont la molécule est douée d'une grande vitesse se sont conservés autour des astres les plus gros, tels l'hydrogène et l'hélium sur le Soleil; les gaz de plus forte densité sont restés attachés à des corps moins importants.

Pour la commodité de l'écriture, les chimistes supposent la molécule composée d'un nombre bien défini d'atomes, généralement très petit, et ils envisagent cet atome comme l'élément ultime, insécable et invariable de la matière pondérable.

Clausius a donné une formule qui exprime le rapport du travail interne de la molécule au travail total fourni à une masse gazeuse susceptible de se dilater sous pression constante. Ce rapport est exprimé en fonction des deux chaleurs spécifiques du gaz, sous pression constante et sous volume constant [1]. Il admet deux limites, qui sont 0 et 1; le travail interne peut, en effet, être nul, ou peut former à lui seul le travail total. Dans le premier cas, le rapport des chaleurs spécifiques est égal à $\frac{5}{3}$; dans l'autre, il est égal à l'unité.

---

[1] Voici la formule de Clausius :

$$\frac{K}{H} = \frac{3}{2}\,\frac{C - c}{c}.$$

K = énergie interne.
H = énergie totale.
C, c, chaleurs spécifiques sous pression constante et à volume constant.

Or on connaît certains corps gazeux, la vapeur de mercure ou de cadmium, par exemple, qui correspondent à la première de ces valeurs. L'argon et l'hélium, découverts récemment, sont dans le même cas. Pour ces corps, le travail interne de la molécule est nul, et on les a nommés *monoatomiques*. Suivant l'idée des chimistes, leur molécule est composée d'un seul atome.

On sait, d'autre part, que le spectre de ces gaz se compose de plusieurs raies qui, pour les deux premiers au moins, possèdent la propriété d'être particulièrement fines. Mais le fait de posséder un spectre composé même d'une seule raie indique que la molécule qui l'émet contient au moins deux éléments susceptibles de se déplacer (1).

L'argon a un spectre complexe, et l'on peut en conclure que sa molécule se compose d'un grand nombre d'éléments distincts; cependant la théorie peut ne pas être en défaut. En effet, les spectres de raies n'ont pas pu, jusqu'ici, être obtenus par une simple élévation de la température du gaz, avec laquelle toute action chimique ou électrique est évitée (2). Or, dans la détermination des chaleurs spécifiques, les procédés thermiques interviennent seuls. Le cycle se ferme donc sur l'idée que la molécule monoatomique contient plusieurs éléments indifférents à la cha-

---

(1) Ces mouvements internes de la molécule, d'apparence compliqués, si l'on en juge par le nombre parfois très grand de raies spectrales que fournit un élément, se produisent suivant des lois numériques, souvent très simples, dont plusieurs sont aujourd'hui connues.

Par exemple, M. Balmer a réussi à représenter la fréquence des diverses vibrations correspondant aux raies spectrales de l'hydrogène par la formule

$$p = p_0 \left(1 - \frac{4}{n^2}\right),$$

n étant un nombre entier.

(2) *Voir*, en particulier, les recherches de M. Pringsheim présentées récemment à l'Académie des Sciences de Berlin.

leur, mais susceptibles de vibrer lorsqu'on leur applique un mode d'excitation convenable.

3. Les forces moléculaires. — Le mode d'excitation le plus fréquemment employé pour obtenir les spectres des gaz consiste à les soumettre à l'action de décharges électriques dont nous étudierons plus loin la nature. On est ainsi conduit directement à admettre que les éléments de la molécule sont susceptibles de vibrer sous l'action d'impulsions de nature électrique, et qu'ils sont eux-mêmes doués de propriétés analogues à celles des corps chargés d'électricité. La grande loi de l'électrolyse découverte par Faraday s'adapte merveilleusement à cette idée ; on n'aura donc pas de peine à la considérer comme parfaitement légitime.

Les molécules des gaz monoatomiques sont-elles composées d'éléments matériels distincts possédant chacun une charge électrique? Ces éléments sont-ils insécables, formant un tout qui possède ses charges distinctes? On ne saurait le dire pour le moment; mais nous retiendrons comme très probable ce fait qu'il existe, dans la molécule de la constitution la plus simple, un ensemble parfois compliqué, de nature essentiellement électrique, susceptible de se déformer sous l'action de certaines impulsions, et de vibrer suivant un ou plusieurs rythmes parfaitement définis.

Les durées d'oscillation sont légèrement variables d'une molécule à l'autre et sont sans doute influencées par les molécules voisines. Mais, pour plusieurs corps monoatomiques, la durée de chaque vibration particulière ne diffère pas d'un millionième de sa valeur pour les molécules les plus perturbées [1]. La molécule vibre avec la régu-

---

[1] Le procédé d'examen des raies du spectre à l'aide d'un spectroscope, même très dispersif, ne conduit pas, à beaucoup près, à des résultats aussi

larité d'un excellent chronomètre, ce qui est l'indice de propriétés élastiques d'une remarquable constance.

Quelles sont les forces qui agissent entre les molécules voisines?

D'abord, les attractions newtoniennes, qui s'exercent en raison directe des masses et qui sont une propriété additive de la matière, doivent subsister entre ses dernières particules. Puis, d'autres forces, insensibles aux distances mesurables, viennent s'y ajouter. On sait, par l'expérience classique de M. Rowland, répétée par M. Himstedt, qu'une masse électrique en mouvement produit un effet électrodynamique semblable à celui du courant électrique découvert par Ampère. Or, dans les mouvements des molécules, les charges électriques sont entraînées de telle sorte que, à ce point de vue particulier, une molécule pourra presque toujours être considérée comme le support d'une oscillation électrique. Les circuits voisins exercent les uns sur les autres certaines actions mécaniques, d'origine électromagnétique, dont la loi pourrait être trouvée si l'on connaissait la forme des circuits. M. Galitzine a montré récemment [1] que ces forces varient suivant une puissance inverse de la distance certainement supérieure à la troisième, et probablement voisine de la quatrième.

---

détaillés que la méthode de visibilité des franges, imaginée par M. Fizeau et perfectionnée par M. Michelson, qui l'a employée avec beaucoup de succès à l'étude du spectre d'un grand nombre de corps et à diverses recherches de Physique ou d'Astronomie.

Les études de M. Michelson ont montré qu'en général les vapeurs monoatomiques donnent des raies spectrales extrêmement fines. Le cadmium, en particulier, donne trois raies visibles, largement séparées et d'une finesse telle que leurs interférences sont parfaitement nettes pour une différence de marche de 500000 longueurs d'onde. (*Travaux et Mémoires du Bureau international des Poids et Mesures*, t. XI).

[1] B. Galitzine, *Ueber die Molecularkräfte und die Elasticität der Molecule* (*Bulletin de l'Académie des Sciences de Saint-Pétersbourg*, t. III, p. 1; 1895).

D'autre part, Maxwell avait admis que, à partir d'une distance très faible, les molécules se repoussent suivant la réciproque de la cinquième puissance de leur distance. Ces deux hypothèses sont bien d'accord entre elles, puisque, quels que soient les coefficients des deux termes, l'ensemble des deux forces doit s'annuler dans une certaine région, tandis que la force est attractive au dehors, répulsive à l'intérieur. La répulsion, qui prend des valeurs considérables lorsque les molécules arrivent très près l'une de l'autre, les éloigne après ce que l'on pourrait nommer leur *choc*.

Cette hypothèse de Maxwell, d'une répulsion entre les molécules, a été attaquée par les mêmes arguments qui avaient fait abandonner, d'une manière générale, la conception fondamentale de l'ancienne théorie des gaz. Mais les deux cas ne sont nullement comparables. L'idée actuelle attribue à cette force répulsive un rayon d'action sensible très petit, comparé à la distance des molécules dans un gaz voisin de l'état parfait. Dans une détente quelconque, faite en partant de cet état du gaz, le travail produit par ces répulsions est très petit, et doit échapper à l'expérience. Il serait probablement appréciable si l'on partait d'un gaz dans les conditions où le produit pv de la pression par le volume a dépassé sensiblement sa valeur minima.

CHAPITRE II.

LA LUMIÈRE.

4. Le spectre. — L'éther, qui propage, par ses vibrations transversales, un genre particulier d'énergie, semble susceptible de prendre indifféremment tous les modes vibratoires imaginables. On n'a pas reconnu, jusqu'ici, qu'il prît certaines périodes de préférence à d'autres, et, lorsqu'on a trouvé une limite à sa vibration, on en a toujours découvert la cause dans des propriétés de la matière indépendantes de celles de l'éther.

Peu à peu, les modes de vibration connus sont allés en augmentant; le spectre visible, qui forme à peu près une octave de vibrations, s'est étendu dans les deux sens, et a été exploré jusqu'à une grande distance de ses limites. La Photographie nous a révélé les longueurs d'onde les plus courtes, tandis que la mesure directe de l'énergie, à l'aide d'un bolomètre à variation de résistance, ou d'une pile thermo-électrique, a permis d'explorer les grandes longueurs d'onde.

L'une des difficultés de l'étude du spectre ultra-violet réside dans le pouvoir absorbant de presque tous les corps pour les radiations de faible longueur d'onde. Déjà, par l'emploi d'un système optique en quartz, on recule beaucoup les limites des radiations que permettent de mesurer

les appareils en flint. Plus loin, l'air lui-même oppose aux mesures une première impossibilité. Pendant longtemps, les plus courtes longueurs d'onde connues furent celles qu'avait mesurées M. Cornu, dans le spectre de l'aluminium. La dernière raie non absorbée correspond, comme l'a montré l'illustre physicien, à une longueur d'onde de $0^{\mu},185$. Mais l'exploration a pu être poussée plus loin encore, en attendant une mesure précise. Un savant autrichien, M. Schumann, est parvenu, par des procédés photographiques très délicats, et en opérant dans le vide, à révéler l'existence de radiations dont la longueur d'onde est voisine de $0^{\mu},1$. Dans ces recherches, le grain de la plaque rend les opérations particulièrement incertaines, et l'on n'obtient des résultats bien nets que par l'emploi d'émulsions très homogènes.

Dans l'infra-rouge, de bonnes mesures ont été faites par le regretté Mouton, M. Henri Becquerel, MM. Desains et Curie, plus récemment, par M. Rubens et M. Paschen, et par M. Carvallo. Mais le plus important ensemble de recherches sur cette portion du spectre est dû à M. Langley, secrétaire de la *Smithsonian Institution,* à Washington. Les radiations qu'il a suivies, sinon mesurées exactetement, atteignent la longueur d'onde de 30^{μ}. Puis vient un espace encore inexploré, et vers 6^{mm}, nous retrouvons des longueurs d'onde mesurées dont l'origine est purement électrique. Les recherches de Hertz l'avaient conduit, comme on sait, à produire, par la décharge d'un système de conducteurs d'une forme particulière, des oscillations électriques extrêmement rapides, que Maxwell avait, depuis longtemps, assimilées aux oscillations lumineuses; en effet, depuis que l'on sait produire des vibrations électriques encore plus rapides que celles de Hertz, on a pu répéter, par leur moyen, toutes les expériences clas-

siques de l'Optique, y compris la double réfraction.

Les oscillations électriques de faible longueur d'onde ont été obtenues par M. Righi d'abord, puis, plus récemment, par M. Lebedef. Le nombre que nous venons de citer, de 6^{mm}, se rapporte aux expériences de ce savant.

La vitesse de propagation des oscillations électriques a été mesurée directement par plusieurs physiciens, parmi lesquels nous citerons M. Blondlot, de Nancy, et M. J. Trowbridge, de Harvard College. Cette vitesse, que les mesures ont révélée égale à celle de la lumière, ne laisse aucun doute sur l'identité des mouvements de l'éther auxquels correspondent les ondes lumineuses et les ondes d'origine électrique. Toutes les théories de l'induction admettent la possibilité d'ondes électriques plus lentes que celles qui ont été observées, jusqu'à une lenteur infinie. Ces ondes se propagent comme les ondes rapides, et il n'y a aucune raison de croire que le spectre soit limité au-dessous des radiations de longueur d'onde infinie.

Il reste encore une lacune à combler; entre les longueurs d'onde de 30^{μ} et celles de 6^{mm}, on n'a encore rien mesuré; mais chaque année resserre l'espace resté vide.

5. Émission et absorption. — Les corps susceptibles d'émettre une radiation donnée sont aussi ceux qui l'absorbent. Ce principe, établi pour la première fois dans toute sa généralité par Kirchhoff, est déjà contenu dans les idées de Prévost, et se déduit immédiatement du principe beaucoup plus général de Sadi Carnot. Si la loi de Kirchhoff était erronée, dans le cas où aucune modification chimique ne se produit, on pourrait, en effet, par un arrangement particulier de corps divers, faire passer continuellement de la chaleur de l'un à l'autre, dans le sens inverse de la chute de température. L'hypothèse des charges ato-

miques fait rentrer dans les équations générales appliquées à des phénomènes connus les lois de l'émission et de l'absorption (2).

Dans cette hypothèse, les molécules ne sont pas autre chose que des excitateurs et des résonateurs électriques, auxquels on peut appliquer les équations qui régissent les actions mutuelles de ces deux espèces d'appareils. Cette théorie fait ainsi remonter à une cause commune l'ensemble du spectre, quelle que soit la longueur d'onde de la radiation considérée. L'identité des oscillations électriques et des radiations proprement dites étant déjà admise, on ne fait que compléter l'idée en adoptant la similitude des causes.

Il ne semble pas, à première vue, que le spectre dû à la radiation des particules ultimes de la matière doive être limité du côté des grandes longueurs d'onde. Toutefois, M. Willy Wien a démontré que, si l'on admettait l'identité de la chaleur rayonnante [1] et des oscillations électriques et la rigueur absolue du principe de Carnot, on devrait renoncer à chercher, dans le spectre produit par les vibrations des molécules, des radiations de longueur d'onde infinie.

L'idée la plus répandue parmi les physiciens est que les spectres de lignes sont dus à l'oscillation électrique à l'intérieur de la molécule; les spectres de bandes reconnaissent la même cause et prennent naissance lorsque les circuits moléculaires sont assez voisins pour modifier leurs périodes respectives d'oscillation (3). Quant aux spectres d'incandescence proprement dits, qui sont absolument continus et suivent une loi de répartition bien détermi-

---

[1] W. Wien, *Die obere Grenze der Wellenlängen, welche in der Wärmestrahlung fester Körper vorkommen können* (*Annales de Wiedemann*, t. XLIX, p. 633; 1893).

née, on les attribue en général à un mouvement d'ensemble de la molécule. Il y a évidemment une certaine difficulté à faire intervenir, dans le phénomène, cette nouvelle cause que l'on ne peut guère ramener sans artifices à l'idée des oscillations électriques. Mais, d'autre part, on aurait quelque peine à comprendre comment le simple élargissement d'un système quelconque de raies ou de bandes conduit à une répartition de l'énergie, qui est sensiblement la même dans le spectre de tous les corps incandescents ne présentant aucun phènomène de phosphorescence ou d'émission anomale.

Des deux côtés, on est donc conduit à une contradiction, au moins apparente. Nous ne pousserons pas plus avant la discussion, et nous nous bornerons à faire remarquer que le théorème de M. W. Wien se réduit, en définitive, à admettre que les oscillations très lentes des molécules ne donnent pas lieu à des radiations, ou, tout au moins, que ces radiations, si elles se propagent, contiennent une quantité d'énergie pratiquement négligeable.

6. La réfraction anomale. — Dans la région du spectre où ils sont très transparents, les corps réfractent la lumière d'autant plus que les vibrations qui les produisent sont plus rapides. Il n'en est pas de même dans les régions où les radiations sont absorbées. M. Le Roux, en 1862, M. Christiansen, quelques années après, ont découvert le phénomène de la dispersion anomale, qui se produit au voisinage des bandes d'absorption.

Toutes les théories modernes de l'Optique tiennent compte de ce renversement dans l'ordre des réfrangibilités. L'idée fondamentale de ces théories a été indiquée par Lord Kelvin, dans un cours qu'il fit, en 1884, à l'Université Johns Hopkins, à Baltimore. « Cette théorie est, avec plus

de précision, celle de M. Boussinesq (1867), déjà conçue, paraît-il, et exposée de vive voix bien antérieurement par Sir G.-G. Stokes [1] ».

« Je suis confus d'avouer, disait à ce propos l'illustre savant, que je n'avais jamais entendu parler de la dispersion anomale jusqu'au moment où je l'ai aperçue dans ces formules; et j'appris alors qu'on l'avait observée depuis huit ou dix ans. »

L'idée directrice de la théorie est que, lorsque l'oscillation de l'éther autour de la molécule possède une période peu supérieure à celle de la vibration que la molécule elle-même peut prendre, celle-ci exécute des mouvements de grande amplitude; l'énergie cinétique des molécules est alors du même ordre de grandeur que celle de l'éther dans lequel elles se meuvent, et la vitesse de propagation du mouvement se trouve modifiée.

La formule que Lord Kelvin déduit de sa théorie conduit à des bandes d'absorption dans lesquelles l'indice prend toutes les valeurs à partir d'une certaine grandeur positive jusqu'à zéro, et même jusqu'à des valeurs imaginaires. Celles-ci correspondent à l'absence totale de propagation. D'après la formule, les bandes d'absorption sont nettes vers les grandes longueurs d'onde, diffuses à l'autre extrémité.

Les théories de von Helmholtz, de M. Ketteler, de M. Drude conduisent à des résultats analogues.

---

[1] Sir W. Thomson, *Conférences scientifiques et allocutions*, traduites par P. Lugol, avec des extraits de Mémoires récents de Sir W. Thomson et quelques notes par M. Brillouin (Paris, Gauthier-Villars et fils; 1893).

Voici la formule de dispersion donnée par lord Kelvin :

$$n^2 = A - BT^2 \left(1 + \frac{q_1 T^2}{\tau_1^2 - T^2} + \frac{q_2 T^2}{\tau_2^2 - T^2} + \cdots\right)$$

n est ici l'indice de réfraction, A et B des constantes, q_1, q_2, des nombres, enfin τ_1, τ_2.... les durées de vibration propres des molécules absorbantes. T est la période de vibration lumineuse considérée.

Les premières recherches sur la dispersion anomale avaient montré seulement que l'ordre de réfrangibilité est renversé dans certains corps. Les expériences plus récentes d'un grand nombre de physiciens ont conduit au résultat surprenant que l'indice de réfraction de plusieurs corps, dans des régions particulières du spectre, est plus petit que l'unité.

Nous citerons, en particulier, d'après Kundt [1] et ses disciples, MM. du Bois et Rubens, les valeurs suivantes de l'indice dans les métaux :

EXPÉRIENCES DE M. KUNDT.

Métaux.	Indices moyens pour la lumière		
	rouge.	blanche.	bleue.
Argent	»	0,27	»
Or	0,38	0,58	1,00
Cuivre	0,45	0,65	0,95
Platine	1,76	1,64	1,44
Fer	1,81	1,73	1,52
Nickel	2,17	2,01	1,85
Bismuth	2,61	2,26	2,13

EXPÉRIENCES DE MM. DU BOIS ET RUBENS [2].

Métaux.	Indices pour les raies			
	Li α	D	F	G
Fer	3,12	2,72	2,43	2,05
Cobalt	3,22	2,76	2,39	2,10
Nickel	2,04	1,84	1,71	1,54

---

[1] A. Kundt, *Ueber die Brechungsexponenten der Metalle* (*Annales de Wiedemann*, t. XXXIV, p. 469; 1888). — H. du Bois et H. Rubens, *Brechung und Dispersion des Lichtes in einigen Metallen* (*Ibid.*, t. XLI, p. 507; 1890).

[2] Voici les longueurs d'ondes correspondant aux raies portées dans les Tableaux :

Li α	$0^{\mu},671$
D	0 ,589
Tl (vert)	0 ,535
F	0 ,486
Sr (bleu)	0 ,461
G	0 ,434

Enfin, M. D. Shea [1] a montré que la loi de Snellius-Descartes ne se vérifie pas dans les métaux, de telle sorte que l'indice doit être défini à la fois en fonction de la longueur d'onde et de l'incidence. Il a trouvé les indices suivants ramenés aux rayons normaux :

Métaux.	Indices pour les raies			
	Li α	D	F	G
Argent.....	0,25	0,27	0,20	0,27
Or.....	0,29	0,66	0,82	0,93
Cuivre.....	0,35	0,60	1,12	1,13
Platine.....	2,02	1,76	1,63	1,41

Les résultats suivants sont dus à M. Pflüger [2] :

Corps.	Indices pour les raies					
	Li α	D	Tl	F	Sr	G
Fuchsine.....	2,34	2,64	1,95	1,05	0,83	1,04
Cyanine.....	2,08	1,70	1,20	1,45	1,49	1,61
Rouge de Magdala.	2,06	1,90	1,56	1,54		1,72
Violet d'Hofmann.	2,53	2,20	1,27	0,86		1,32

Ces quatre substances possèdent des bandes d'absorption ainsi définies :

Corps.	Limites.	
Fuchsine.....	0^{μ},623 net.	0^{μ},45 estompé.
Cyanine.....	0 ,650 »	0 ,50 un peu estompé.
Rouge de Magdala..	0 ,597 »	0 ,48 très estompé.
Violet d'Hofmann...	0 ,660 »	0 ,49 estompé.

Ces expériences confirment d'une manière remarquable la théorie de Lord Kelvin.

La répétition des mesures de Kundt par MM. du Bois et Rubens conduit, pour le fer, à des valeurs sensiblement

---

(1) D. Shea, *Zur Brechung und Dispersion des Lichtes durch Metallprismen* (*Annales de Wiedemann*, t. XLVII, p. 177; 1892).

(2) A. Pflüger, *Anomale Dispersionscurven einiger fester Farbstoffe* (*Annales de Wiedemann*, t. LVI, p. 412; 1895).

différentes de celles qui avaient été trouvées d'abord. Les dernières mesures, faites sous la direction de Kundt, méritent naturellement une plus grande confiance que les premières, destinées seulement à reconnaître la marche générale du phénomène.

Les expériences sur les métaux montrent que, à mesure qu'on s'approche des faibles longueurs d'onde, l'indice tend vers l'unité en partant soit de valeurs plus fortes, soit de valeurs plus faibles; le cuivre seul fait exception.

La théorie indique que la diminution de l'indice vers les faibles longueurs d'onde doit se produire dans la première partie de la bande d'absorption; le relèvement a lieu vers la fin de la bande, après un minimum généralement inférieur à l'unité. Toutes les valeurs du premier Tableau indiquent une dispersion anomale, puisque l'indice n'augmente vers le violet que pour des valeurs inférieures à l'unité.

Les substances moins absorbantes étudiées par M. Pflüger permettent de suivre le phénomène sur une plus grande étendue. Dans tous ces corps, le passage par le minimum est nettement accusé.

Le même phénomène se retrouve dans l'infra-rouge. On sait, en effet, que les radiations infra-rouges sont absorbées par l'eau à une petite distance du spectre visible; pour un œil sensible aux radiations de 2^{μ}, l'eau serait noire comme de l'encre. Or on a trouvé que l'indice de réfraction de ce liquide, pour les oscillations lentes d'origine électrique, est compris entre 8 et 9. C'est l'indice anomal correspondant au commencement de la bande d'absorption.

M. Drude [1] a trouvé enfin une dispersion anomale bien

---

[1] P. Drude, *Ueber die anomale elektrische Dispersion von Flüssigkeiten* (*Abhand. der Math. phys., Classe der Königl. Sächs Gesellsch. der Wissensch. Göttingen*, t. XXIII, p. 1; 1896).

nette dans divers liquides pour des longueurs d'onde de l'ordre de 1^m. Voici quelques-uns de ses résultats :

	$\lambda = 12^m$	2^m	$0^m,75$
Glycérine.....	$n = 7,50$	6,25	5,04
Alcool amylique.	3,78	3,29	2,35
Acide acétique...	3,21	2,66	2,51

Ces trois liquides présentent une forte absorption dans cette région.

Enfin, Sir G.-G. Stokes a découvert que les miroirs en argent poli ne peuvent pas être employés comme réflecteurs pour l'étude du spectre ultra-violet, parce qu'ils éteignent les rayons les plus réfrangibles, et M. Cornu est arrivé au même résultat avec l'argenture chimique. M. de Chardonnet [1], au cours de ses importantes recherches sur l'absorption dans l'ultra-violet, a reconnu que l'on obtient une action photographique énergique derrière un miroir de Foucault, complètement opaque pour les radiations visibles. L'image de l'arc électrique peut être photographiée en quelques secondes au travers de deux miroirs de Foucault complètement opaques.

Nous avons vu que, si les principes de la Thermodynamique ont été correctement appliqués, le spectre d'émission des corps est limité du côté des grandes longueurs d'onde. Il l'est probablement aussi vers les oscillations rapides. Pour une quantité donnée d'énergie contenue dans une vibration, l'amplitude diminue en même temps que la période, et dans la même proportion. Il est donc dans la nature des choses que l'amplitude des radiations de très faible longueur d'onde soit dans tous les cas très petite.

---

[1] De Chardonnet, *Sur la transparence actinique de quelques milieux et, en particulier, sur la transparence actinique des miroirs de Foucault et leur application en Photographie* (*Journal de Physique*, t. I, p. 305; 1882).

Il est, de plus, fort improbable que la vitesse de vibration des molécules ou des atomes dépasse certaines limites, qui feraient entrer en jeu des efforts trop considérables et compromettraient l'intégrité de la molécule.

La théorie indique que les corps peuvent posséder un grand nombre de bandes distinctes, alternativement transparentes et absorbantes; pour les métaux, en particulier, le pouvoir absorbant est sans doute moins étendu qu'on ne le croit communément. Pour l'argent, la preuve de la transparence a été donnée, comme nous venons de le voir; et l'on sait, d'autre part, que la feuille d'or laisse passer des radiations d'un beau vert-pomme. En se reportant aux expériences de Kundt, on verra, en effet, que la bande d'absorption dans ce métal doit prendre fin vers l'extrémité violette du spectre visible. L'indice étant déjà beaucoup relevé dans une partie du spectre visible lui-même, l'absorption y est relativement faible, de telle sorte que l'extrémité rouge seule est complètement absorbée.

7. La lumière ultra-violette. — Les radiations de très faible longueur d'onde présentent un intérêt tout particulier, en connexion avec la matière pondérable. La limite de grandeur que l'on assigne à la molécule est, en effet, de l'ordre du millionième de millimètre, pour les molécules les plus grosses. Les plus courtes longueurs d'onde étudiées jusqu'à ce jour ne sont que cent fois plus étendues, et, comparées à ces oscillations, les dimensions moléculaires ne sont plus négligeables. Par rapport à ces radiations, la matière apparaît déjà avec une certaine discontinuité et possède des propriétés bien différentes de celles qu'elle manifeste vis-à-vis des radiations ordinaires. On sait, depuis Fresnel, que les corps grenus, dont l'élément n'est pas lui-même absorbant, sont d'autant plus transpa-

rents que les radiations qui les frappent ont une plus grande longueur d'onde. Clausius et Lord Rayleigh ont établi des formules exprimant le résidu d'énergie vibratoire après le passage à travers un corps composé de petits sphérules égaux. Ces formules, qui sont naturellement exponentielles, contiennent, comme facteur de l'épaisseur, dans l'expression de l'exposant, une puissance inverse de la longueur d'onde, qui est soit la deuxième, soit la quatrième.

D'autre part, les recherches que l'on a pu faire à l'aide des oscillations électriques ont montré que la plupart des corps qui ne doivent leur opacité qu'à leur état grenu sont d'une parfaite transparence dès que la longueur d'onde dépasse sensiblement l'étendue du grain. Les premières recherches de Hertz sur la réfraction des ondes électriques ont été faites sur un prisme d'asphalte qui se montra transparent. Le bois, le carton, l'ébonite et, d'une manière générale, tous les corps non conducteurs laissent passer les radiations d'origine électrique. On n'aura donc pas de peine à admettre qu'il puisse en être de même des dernières particules de la matière lorsque l'on aura dépassé les régions du spectre dans lesquelles elles résonnent avec facilité.

Ces propriétés de la lumière ultra-violette sont de celles que l'on peut prévoir avec une plus ou moins grande probabilité; il en est d'autres que rien ne pouvait faire soupçonner, et dont la découverte est due en grande partie au hasard.

Au début de ses recherches sur les oscillations électriques, Hertz observa une action très marquée de l'étincelle du circuit primaire sur celle du résonateur [1]. Tandis

---

[1] Hertz, *Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electrische Entladung* (*Annales de Wiedemann*, t. XXXI, p. 983; 1887).

que cette dernière éclatait à chaque oscillation à l'air libre, elle cessait aussitôt que les boules entre lesquelles se produisait la décharge étaient enfermées dans une boîte quelconque. Démontant successivement toutes les parties de la boîte, Hertz reconnut bientôt qu'une seule propriété de l'étincelle, sa radiation lumineuse, était en jeu dans le phénomène. L'interposition d'un corps opaque quelconque, conducteur ou diélectrique, arrêtait également l'action; quelques corps cristallisés faisaient exception; le sucre, l'alun, le sel gemme, la diminuaient très peu sous de faibles épaisseurs; quant au quartz, il se montra d'une transparence telle que, sous une épaisseur de plusieurs centimètres, son absorption était à peine sensible.

Il était dès lors naturel d'attribuer l'action de l'étincelle aux radiations de courte longueur d'onde, qui l'accompagnent toujours lorsqu'elle éclate entre deux morceaux de métal. L'expérience confirma immédiatement cette manière de voir, car les sources de lumière quelconque agissaient comme l'étincelle électrique, et se montrèrent d'autant plus actives qu'elles contenaient une plus grande proportion de radiations ultra-violettes.

En masquant l'une après l'autre toutes les parties de l'ensemble formé par les deux boules et leur intervalle, Hertz reconnut que l'organe le plus sensible à la lumière ultra-violette est l'électrode négative.

Cette action de la lumière ultra-violette ne se fait pas seulement sentir sur un intervalle de peu d'étendue où l'étincelle est susceptible d'éclater; elle est tout aussi marquée dans le cas de la décharge lente d'un corps électrisé isolé dans l'espace, ainsi que l'a montré M. Hallwachs. Ce singulier phénomène, étudié par M. Righi, M. Stoletof, MM. Bichat et Blondlot, M. Hoor, M. Branly, et d'autres physiciens, a été employé pour la première fois par M. Hallwachs

dans l'étude quantitative de l'absorption des radiations [1]. L'électromètre servait à déterminer la proportion de l'énergie vibratoire d'une qualité déterminée qui traversait le corps en expérience.

La cause de ce phénomène, qui paraissait au début complètement isolé, a été trouvée par MM. Lenard et Wolf [2]; ils ont ramené la décharge des corps sous l'influence de la lumière ultra-violette à une convection de l'électricité dont les poussières détachées de la masse formaient le support.

Ces deux habiles physiciens sont parvenus, à l'aide d'un jet de vapeur sursaturée [3], à suivre exactement la marche de cette poussière, et à en constater l'existence autour du corps électrisé négativement toutes les fois qu'il perdait rapidement sa charge sous l'action de la radiation. De tous les métaux, c'est l'argent qui s'est montré le plus facile à pulvériser par la radiation. Viennent ensuite l'or [4], le

---

(1) HALLWACHS, *Ueber den Einfluss des Lichtes auf electrostatisch geladene Körper* (*Annales de Wiedemann*, t. XXXIII, p. 301; 1888). — *Ueber den Zusammenhang des electrischen Electricitätsverlustes durch Beleuchtung mit der Lichtabsorption* (*Ibid.*, t. XXXVII, p. 666; 1889).

(2) LENARD et WOLF, *Zerstäuben der Körper durch des ultraviolette Licht* (*Annales de Wiedemann*, t. XXXVII, p. 443; 1889).

(3) M. Aitken et, après lui, R. von Helmholtz, ont démontré que l'air peut se sursaturer très fortement d'humidité, à la condition d'être complètement dépourvu de poussières; la condensation qui se produit sur les noyaux préexistants est d'autant plus rapide que les particules en suspension sont plus abondantes.

M. Aitken a utilisé le premier ce phénomène pour déduire, de l'aspect du jet de vapeur, le nombre moyen de centres de condensation existant dans l'unité de volume d'air.

(4) La pulvérisation des métaux s'observe, apparemment du moins, en dehors de l'action de la lumière ultra-violette; M. Pellat a démontré, par l'étude des forces électromotrices de contact, que deux plaques de métal en regard font échange de matière.

L'évaporation du métal a été fréquemment observée, soit dans l'emploi des tubes à vide où la pulvérisation peut être ramenée à l'action de la lumière ultra-violette, soit dans les lampes à incandescence où cette action est moins évidente. M. Goldstein signala, en 1880, la présence, sur les cathodes, de li-

fer, le plomb, l'étain, le cuivre, le platine, le mercure et le zinc [1].

Le quartz lui-même perd, à la surface opposée à la source de lumière, des poussières qui s'échappent normalement à son plan. MM. Lenard et Wolf, qui ont étudié le phénomène de très près, pensent que les particules quittant le cristal sont composées de silicate de soude; ce sel, absorbant la lumière ultra-violette, doit subir son action et prendre un état vibratoire qui le détache de la masse où il est enfermé.

Les expériences sur l'électrolyse du verre que nous rapporterons dans le troisième Chapitre enlèvent à cette hypothèse ce qu'elle pourrait avoir d'invraisemblable à première vue.

La pulvérisation des métaux n'est pas, du reste, le seul mode d'action de la lumière ultra-violette sur les décharges électriques. M. Svante Arrhenius a montré, dans une série de beaux travaux [2], que les gaz sont dissociés par cette radiation, et il attribue le surcroît de conductibilité aux ions libres qui se trouvent alors répartis dans la masse. Si les radiations de faible longueur d'onde exercent une

---

gures d'une forme particulière, attribuables à une corrosion du métal en des endroits bien déterminés par la forme des électrodes et celle du tube.

M. Fleming a indiqué l'un des premiers, en 1883, l'évaporation des attaches dans les lampes à incandescence. L'ampoule se recouvre intérieurement de poudre métallique abandonnée par les fils qui amènent le courant à la fibre de charbon. Cette dernière projette une ombre bien nette dans le miroir métallique, ce qui montre que les particules arrachées aux électrodes se meuvent en ligne droite, sans doute avec une grande vitesse.

(1) On remarquera que les deux métaux les plus sensibles à l'action sont ceux qui, d'après Kundt et M. Shea, sortent de la bande d'absorption au commencement de l'ultra-violet. Il serait intéressant de voir si l'argent employé comme cathode dans les tubes de Crookes favorise la production des rayons cathodiques.

(2) Sv. Arrhenius, *Ueber das Leitungsvermögen der phosphorescirenden Luft* (*Mémoires de l'Académie des Sciences de Suède*, t. XIII, 14 sept. 1887). —*Ueber das Leitungsvermögen beleuchteter Luft* (*Ibid.*, 11 janvier 1888).

action chimique sur les gaz, il est naturel qu'ils les absorbent en notable quantité, et c'est peut-être la raison pour laquelle on ne trouve pas, au fond de l'atmosphère, de radiations de très faible longueur d'onde dans le spectre solaire.

En résumé, les vibrations rapides de l'éther communiquent aux particules matérielles une énergie cinétique souvent suffisante pour en détruire la cohésion. Cette action est particulièrement énergique lorsque le corps possède une charge d'électricité négative. L'interposition d'un écran entre la source et le récepteur permet, en diminuant l'action, de déterminer l'intensité de l'absorption dans l'écran.

Ces propriétés, caractéristiques de certaines radiations, jouent probablement un rôle très important dans les phénomènes que nous étudierons plus loin ; elles donneront peut-être le moyen de décider entre les diverses théories que l'on a proposées pour expliquer l'existence des rayons de M. Röntgen.

Nous ajouterons que cette propriété des radiations ultraviolettes est partagée à un certain degré par la lumière ordinaire, à la condition que le récepteur y soit sensible. MM. Elster et Geitel ont trouvé que les métaux alcalins sont dans ce cas.

8. Analogies acoustiques. — Il est certains phénomènes, peu accessibles au calcul, que l'on peut élucider partiellement par une analogie suffisamment serrée ; c'est ainsi que les phénomènes de l'Acoustique, dans l'étude desquels on opère sur des longueurs mesurables, permettent de prévoir en gros les transformations que les particules matérielles feront subir aux vibrations de l'éther qui produisent la lumière. Sans doute, l'analogie n'est pas complète, puisque

les ondes sonores sont longitudinales et les ondes lumineuses transversales. De plus, il y a une grande analogie entre l'énergie que dissiperont les particules moléculaires et celle qu'elles reçoivent d'un faisceau lumineux, tandis que les parcelles de matière qui absorbent les vibrations de l'air sans les transmettre dégradent l'énergie et la dissipent sous une forme différente de celle qui les a mises en mouvement.

Malgré cela, l'analogie est encore assez parfaite pour que l'on puisse tirer quelque bénéfice de son étude.

Considérons un système matériel composé d'un grand nombre d'organes semblables — des timbres d'appel, par exemple, — susceptibles de vibrer sans qu'un amortissement sensible se produise par consommation d'énergie dans leur masse. Si un son continu frappe l'ensemble, chacun des corps qui le composent se mettra à vibrer suivant sa période propre, et l'amplitude de la vibration sera d'autant plus grande que cette période sera plus voisine de celle de la source. Supposons que le milieu soit excité à l'unisson des timbres qui le composent; chacun d'eux prendra un mode vibratoire dont l'amplitude augmenterait jusqu'à la rupture, si, à leur tour, ces timbres ne communiquaient à l'air une portion de leur énergie. Si la vitesse de la transmission à l'intérieur de chacun de ces timbres est inférieure à la vitesse de propagation du son dans l'air, cette dernière ne sera que peu affectée par la traversée de l'ensemble. Mais, si cette vitesse est plus grande, le mouvement s'accélérera en traversant le milieu artificiel, et il en résultera une plus grande vitesse du son au travers de l'ensemble qu'à l'air libre. L'expérience ne serait pas trop difficile à réaliser. Elle donnerait une image très exacte de ce qui se passe lorsqu'un faisceau de lumière monochromatique traverse un corps qui l'absorbe par résonance.

Nous avons vu qu'alors la vitesse de propagation du mouvement lumineux peut être augmentée, sans cependant l'être toujours (**6**).

Les phénomènes sont sensiblement différents lorsque l'onde sonore traverse un milieu composé d'un gaz et de particules solides peu élastiques et n'ayant pas un mode vibratoire bien défini. Un espace ainsi constitué sera optiquement l'analogue d'un milieu trouble, ou même d'un ensemble de molécules, si les vibrations de l'éther ont une très faible longueur d'onde. Si les corps ainsi disséminés dans l'espace n'en occupent qu'une très faible partie, la vitesse du son n'en sera pas affectée. En revanche, elle sera modifiée si les particules étrangères occupent, dans l'air, une portion importante de l'espace total.

Un physicien russe, M. Hesehus, a cherché à déterminer les modifications que subit le son à la traversée d'un milieu de ce genre ([1]). Le mode d'investigation consistait à déterminer la distance focale d'une lentille en treillis de fil de fer, remplie de copeaux d'ébonite que l'on pouvait tasser plus ou moins. L'expérience a montré que la vitesse du son était modifiée d'autant moins que la longueur d'onde était plus petite. Pour les grandes longueurs d'onde, le milieu, qui est, de sa nature, indifféremment absorbant, agit comme s'il était continu, et la propagation ne se fait pas. Au contraire, lorsque la longueur d'onde diminue, les inégalités du milieu deviennent apparentes, et la propagation se fait dans les interstices pleins d'air. Par exemple, lorsque la portion remplie par les copeaux est de 3 à 4 pour 100 du volume total, la vitesse de propagation des sons dont la longueur d'onde est de 24^{mm} atteint

---

([1]) Hesehus, *Sur la réfraction et la vitesse du son dans les corps poreux* (*Journal de la Société physico-chimique russe*, t. XXII, p. 233 ; 1890).

261^{m} par seconde. Elle tombe à 146^{m} par seconde pour une densité de 0,14 et une longueur d'onde de 60^{mm}.

La diminution de vitesse du son tend à s'annuler à mesure que diminuent la portion de l'espace occupée par le corps solide indifférent et la longueur d'onde de la vibration sonore. Autant qu'on peut en juger, le rapport des longueurs d'onde utilisées par M. Hesehus aux dimensions des particules solides comprises dans l'espace en expérience est du même ordre de grandeur que celui des longueurs d'onde du spectre visible ou ultra-violet aux dimensions moléculaires. Le rapport des pleins aux vides dans les corps est plus difficile à déterminer; mais l'opinion la plus répandue est que la molécule proprement dite n'occupe qu'une petite partie de l'espace qui la sépare des molécules voisines.

9. Phosphorescence et fluorescence. — Nous n'aurons que quelques mots à dire des phénomènes lumineux singuliers que présentent les corps dans certaines conditions particulières, et auxquels M. E. Wiedemann a donné le nom général de *phénomènes luminescents*.

Dans une enceinte fermée et isotherme, tous les éléments de surface ont le même éclat, à la condition qu'aucun d'eux ne présente des propriétés luminescentes. D'après le principe de Prévost, complété par Kirchhoff (*voir* **5**), cet éclat est même indépendant du pouvoir émissif de chaque élément de la surface interne de l'enceinte. Il n'en est pas de même lorsque celle-ci contient un corps luminescent. Ce dernier se détache de son entourage par une teinte différente correspondant à un déplacement de la répartition de l'énergie dans le spectre. Un corps phosphorescent qui émet une radiation plus réfrangible que celle de l'enceinte ne peut le faire que par suite d'une action chimique qui élève son potentiel.

La fluorescence, ou réflexion épipolique, découverte par Brewster et étudiée par Sir G.-G. Stokes, est d'une tout autre nature ; elle consiste en une transformation des radiations qui frappent certaines substances en radiations d'une autre espèce. Si la phosphorescence et la fluorescence sont complètement séparées, la transformation due au dernier de ces phénomènes commence à l'instant initial de l'éclairement et finit en même temps que lui. Or on sait que les spectres d'émission des corps solides possèdent un maximum d'énergie qui se déplace vers les faibles longueurs d'onde, à mesure que la température de la source s'élève. Si donc la réflexion épipolique se produisait de manière à diminuer les longueurs d'onde de la vibration primaire, l'énergie étant conservée, la température virtuelle de la radiation serait augmentée ; donc, suivant le principe constant de la dégradation, ou de l'augmentation de l'entropie, la transformation doit se faire en remontant vers les grandes longueurs d'onde. C'est ce qu'avait trouvé Stokes ; tous ceux qui ont étudié les mêmes phénomènes en se mettant à l'abri des transformations moléculaires sont arrivés au même résultat [1].

Le terme *fluorescence* a un sens bien précis et ne devrait pas en être détourné. En l'employant dans le cas des tubes de Crookes, on suppose que la lumière qu'ils émettent est due à la dégradation de vibrations éthérées de faible longueur d'onde. Cette théorie est peut-être exacte, mais elle n'est pas suffisamment établie pour fixer une terminologie ; c'est pourquoi nous conserverons, sauf dans quelques cita-

---

[1] Ce principe a été contesté à diverses reprises ; mais la répétition des expériences sur lesquelles étaient fondées les objections a toujours montré, en définitive, que la loi de Stokes est exacte ; cependant, elle pourrait ne pas l'être, si la radiation se transformait en deux parties, l'une plus dégradée que la radiation primitive, l'autre moins. (*Voir* le Chap. IX).

tions, le terme de *luminescence* pour désigner les phénomènes lumineux encore mal définis que nous aurons à étudier.

10. Vibrations longitudinales de l'éther. — L'idée d'une vibration longitudinale de l'éther a surgi à plusieurs reprises, soit dans des investigations purement spéculatives, soit en face d'un phénomène nouveau.

Cauchy, le premier, eut recours à cette hypothèse pour représenter l'énergie de la vibration de l'éther qui apparaît sous forme de chaleur, — la chaleur rayonnante, — qu'il considérait, ainsi que tous ses contemporains, comme différente de la lumière. Il dit, en effet, citant une lettre écrite à Ampère, le 19 février 1836 : « qu'il serait intéressant d'examiner si les vibrations longitudinales ne pourraient pas représenter le mouvement de la chaleur. Or, la question que je proposais alors aux physiciens me paraît aujourd'hui devoir être résolue par l'affirmative. »

Après avoir exposé les motifs qui l'ont conduit à cette idée, Cauchy l'envisage comme suffisamment fondée, ce qu'il exprime en ces termes : « Puisque les vibrations transversales qui s'exécutent sans que la densité varie représentent la lumière, il ne reste, pour représenter la chaleur, que les vibrations longitudinales, ou, ce qui revient au même, les vibrations accompagnées d'un changement de densité [1] ».

Cauchy, à qui les théories de l'Optique doivent de si grands progrès, avait évidemment fait fausse route en ce qui concerne les vibrations longitudinales, puisqu'il est surabondamment démontré aujourd'hui que la lumière et

---

[1] Cauchy, *Mémoire où l'on montre comment une seule et même théorie peut fournir les lois de la propagation de la lumière et de la chaleur* (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. IX, p. 283; 1839).

ce qu'on nommait la *chaleur rayonnante* ne diffèrent que par le procédé qui nous les révèle.

Les vibrations longitudinales ont réapparu, sous une forme bien différente, dans les leçons de Sir W. Thomson à l'Université Johns Hopkins. Nous en extrayons les passages suivants, rappelés par M. Bottomley dans une lettre adressée récemment à *Nature,* à propos du premier Mémoire dans lequel M. Röntgen attribue les nouveaux phénomènes à cette composante de la vibration :

« Nous ignorons l'onde de condensation dans la théorie de la lumière. Nous sommes sûrs que son énergie, si elle n'est pas nulle, est, en tout cas, très petite en comparaison de l'énergie des vibrations lumineuses dont nous nous occupons. Mais dire qu'elle est absolument nulle, serait une hypothèse que nous n'avons pas le droit de faire. Quand nous considérons la petite partie de l'Univers que nous connaissons, et que nous pensons à la transmission du champ électrique, à la transmission du champ magnétique et à la propagation de la lumière, nous ne pouvons supposer qu'il n'existe rien à quoi notre philosophie n'ait songé. Nous n'avons pas le droit d'admettre qu'il ne peut pas exister d'ondes de condensation dans l'éther luminifère. Tout ce que nous savons, c'est que les vibrations de cette espèce, qui prennent naissance dans la réflexion et la réfraction de la lumière, ont certainement une énergie très faible relativement à l'énergie de la lumière dont elles procèdent. Le fait certain, en ce qui concerne la réflexion et la réfraction, est celui-ci : à moins que l'éther luminifère ne soit absolument incompressible, la réflexion et la réfraction de la lumière doivent, en général, donner naissance à des ondes de condensation. Des ondes de distorsion peuvent exister sans ondes de condensation, mais ces

ondes ne peuvent pas se réfléchir à la surface de séparation de deux milieux sans produire dans chacun d'eux une onde de condensation.

» Supposons que nous ayons en un lieu quelconque, dans l'air, ou dans l'éther luminifère (je ne puis distinguer maintenant entre les deux idées), un corps qui, sous l'influence d'actions qu'il est inutile de décrire, mais faciles à concevoir, prenne une électrisation alternativement positive et négative ; ne donnera-t-il pas naissance à des ondes de condensation ? Supposons, par exemple, que nous ayons deux conducteurs sphériques réunis par un fil fin et qu'une force électromotrice alternative agisse dans ce fil : supposons, en outre, que ce dispositif fonctionne à grande distance de toute cause perturbatrice, à une grande hauteur dans l'atmosphère, par exemple : le résultat sera de donner à l'un des conducteurs une électrisation alternativement positive et négative et inversement. Il est parfaitement certain que, si nous produisons des alternances lentes, nous aurons, au voisinage des conducteurs, un champ électrique dirigé alternativement dans un sens et dans l'autre avec des renversements au nombre de deux ou trois cents à la seconde, par exemple, et une transition graduelle du négatif au positif, en passant par zéro, et ainsi de suite ; il en sera de même dans tout l'espace, et nous pouvons indiquer exactement la valeur du potentiel et du champ électrique en tout point à chaque instant. Mais si les alternances deviennent assez rapides, la loi électrostatique pure et simple s'appliquera-t-elle à l'air à différentes distances de chaque sphère ? Si le renversement se produisait avec une rapidité suffisante, plusieurs millions de fois, ou des millions de millions de fois par seconde, les phénomènes observés s'écarteraient sans doute beaucoup de la loi électrostatique qui détermine la

distribution du champ électrique dans l'air au voisinage. Il semble absolument certain qu'une action telle que celle qui se produit donnerait naissance à des ondes électriques. Or il me paraît probable que ces ondes électriques sont des ondes de condensation dans l'éther luminifère ; et la propagation de ces ondes serait sans doute énormément plus rapide que la propagation des ondes lumineuses ordinaires. »

On a eu de nouveau recours aux vibrations longitudinales de l'éther pour expliquer les phénomènes qui accompagnent la décharge cathodique. Cette hypothèse, un peu vague dans les travaux de la plupart des physiciens qui l'ont émise, a pris une forme précise dans un Mémoire de M. Jaumann, dont nous parlerons après avoir décrit les phénomènes auxquels se rapporte ce nouveau développement.

CHAPITRE III.

L'ÉLECTROLYSE.

11. Liquides. — Pendant longtemps, la conduction électrolytique parut liée à l'état liquide, dans lequel elle a été le plus étudiée. Dans ces dernières années, ce phénomène a été trouvé aussi dans les solides et dans les gaz, comme nous le verrons tout à l'heure. On a même cherché à expliquer la conduction métallique par le même phénomène, mais sans grand succès jusqu'ici. La tentative vaut la peine d'être renouvelée, car on simplifierait singulièrement les théories en ramenant à la même cause ces deux modes de propagation du courant.

La théorie primitive de Grotthus, qui admet l'échange des atomes entre les molécules voisines, a été complétée et modifiée par les idées de Van t'Hoff et d'Arrhenius, qui ont introduit cette notion de la dissociation électrolytique, et de l'existence d'ions libres dans la solution. Nous renverrons, pour le développement de cette théorie, à laquelle nous n'emprunterons que l'idée fondamentale, aux nombreux Mémoires publiés depuis quelques années surtout, par les chimistes de l'École de Leipzig.

Nous nous bornerons à rappeler ici, à propos de l'électrolyse des liquides, une curieuse expérience de M. Arons [1].

[1] L. Arons, *Versuche über elektrolytische Polarisation* (*Société de Physique de Berlin*, séance du 11 mars 1892).

Si l'on place, en travers d'une auge électrolytique, une plaque de verre percée d'un trou, on n'observe aucune diminution du courant lorsqu'on ferme l'ouverture par une feuille de métal très mince.

Les recherches poursuivies par M. Daniel ont renseigné très complètement sur la valeur de la polarisation sur les deux faces de la feuille de métal pour diverses épaisseurs et différentes densités de courant [1].

Dans l'eau acidulée, la feuille d'or ne montre aucune polarisation lorsque son épaisseur est inférieure à $0^{\mu},4$. De même, la feuille de platine jusqu'à 2^{μ}, la feuille d'aluminium jusqu'à $0^{\mu},5$, même pour une densité de courant de 0,1 ampère par centimètre carré, ne se polarisent pas. Pour les épaisseurs un peu supérieures à celle où la polarisation commence à se faire sentir, son intensité est proportionnelle à la densité du courant.

Ces expériences nous montrent que l'équilibre s'établit à travers un septum suffisamment mince en métal, et, suivant les idées actuelles sur l'électrolyse, on en conclura que les ions traversent sans résistance appréciable une faible épaisseur des métaux étudiés. Lorsque la couche augmente, la traversée devient plus difficile, mais elle est loin d'être complètement empêchée par des épaisseurs bien mesurables. Ainsi, pour une intensité de courant de 0,004 ampère par centimètre carré, la force électromotrice de polarisation aux deux faces d'une feuille d'or de 4^{μ} n'est que de 0,37 volt.

12. Solides. — Il n'existe aucune démarcation bien tranchée entre l'état solide et l'état liquide. Certains corps,

---

[1] S. Daniel, *Ueber galvanische Polarisations erscheinungen an einer dünnen metallischen Scheidewand in einem Voltameter* (*Annales de Wiedemann*, t. XLIX, p. 281; 1893).

comme la glu marine, pourraient, avec autant de raison, être rangés sous l'un ou l'autre des deux états; le plomb est plus franchement solide, et le cuivre présente une cohésion encore plus grande; cependant, Tresca a montré que ces corps se comportent absolument comme les liquides sous une pression un peu forte.

D'une manière générale, l'état solide ou liquide n'est défini que si l'on indique la pression sous laquelle on envisage le corps en question. Lorsque les efforts deviennent très considérables, la cohésion des corps que nous considérons comme solides n'intervient pas plus que la cohésion de l'eau soumise à l'action de la pesanteur. C'est pour cela qu'il est oiseux de se demander si l'intérieur de la Terre est solide ou liquide; quelle que soit sa composition, il est forcément liquide, eu égard aux pressions auxquelles il est soumis.

D'ailleurs, les molécules des corps éprouvent des déplacements considérables, tout autres que des oscillations sur place, comme on le croit communément. M. Walthère Spring a formé des alliages dans une couche d'une certaine épaisseur au contact de deux métaux, bien au-dessous du point de fusion de chacun d'eux; il se produit, à la surface de contact, une pénétration réciproque qui fait disparaître toute limite tranchée entre les deux blocs primitivement séparés. M. Roberts-Austen a trouvé, de même, que l'or se diffuse dans le plomb bien au-dessous de la température de fusion de ce métal.

Il n'est pas surprenant dès lors que, par l'emploi de forces agissant dans une direction déterminée, on obtienne un transport de matière, comme dans l'électrolyse du verre pratiquée par M. Foussereau, M. Warburg, M. Barus, M. Roberts-Austen.

L'expérience est aisée à réaliser; on remplit de mercure

ou d'acide sulfurique une éprouvette de verre que l'on place dans un bain de même nature ; pour augmenter la mobilité des molécules, on porte le tout à une température élevée, mais bien inférieure à la fusion du verre, 100° ou 200° par exemple. Le courant électrique traverse sans peine les parois de l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il se soit formé du côté positif un dépôt de silice qui devient absolument isolant lorsqu'il atteint une certaine épaisseur. En revanche, l'expérience peut se prolonger indéfiniment lorsqu'on remplace, à l'anode, le mercure par un amalgame alcalin ; la surface du verre se dépolarise alors et cesse d'isoler.

Toutefois, il faut, pour que l'expérience réussisse, que l'alcali ajouté au mercure n'ait pas un volume atomique plus considérable que celui de l'alcali du verre ; dans le cas contraire, son passage est assez difficile. Si son volume atomique est plus faible, le verre perd de sa transparence et de sa cohésion.

M. Barus a trouvé que, en exerçant une traction longitudinale sur l'éprouvette, sa conductibilité augmente dans le sens de l'épaisseur ; on en conclut que les atomes se fraient plus facilement un passage à travers la masse, lorsque, par un moyen quelconque, on augmente la distance des particules de matière entre lesquelles elles doivent passer [1].

13. Gaz. — On s'est peu occupé jusqu'à ces derniers temps de l'électrolyse des gaz et des vapeurs. L'expérience présente, en effet, quelques difficultés, en raison du mé-

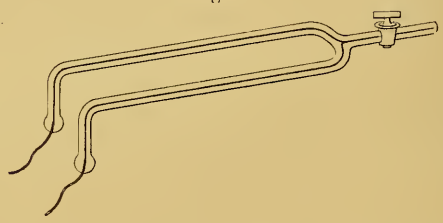
---

[1] Carl Barus, *Résistance électrique du verre comprimé* (*Journal de Physique*, t. IX, p. 522, analyse par M. B. Brunhes). — Ch.-Éd. Guillaume, *La résistance électrique du verre soumis à une déformation mécanique* (*Ibid.*, t. X, p. 39 ; 1891).

lange spontané qui se produit rapidement par diffusion des produits de l'électrolyse. On doit au professeur J.-J. Thomson d'importants travaux sur cette question d'une grande actualité. Nous en extrairons deux expériences typiques que nous décrivions, il y a quelques mois, dans les termes suivants [1] :

« Un tube en U, d'une ouverture aussi faible que possible, reçoit le gaz à examiner. Les extrémités de ce tube,

Fig. 1.



recourbées à angle droit (*fig.* 1), de manière à rester parallèles entre elles, portent les électrodes, et peuvent être amenées dans le champ d'un spectroscope, qui servira à l'analyse des produits de l'électrolyse. La décharge est fournie par une bobine de Ruhmkorf.

» Prenons comme type des expériences, celles qui ont été faites sur l'acide chlorhydrique; elles présentent l'avantage de donner deux spectres bien nets, l'un rouge, correspondant à l'hydrogène, l'autre vert, produit par le chlore.

» Le gaz étant à une faible pression dans le tube, les premières décharges l'éclairent en gris verdâtre, puis, peu à peu, le phénomène change, l'anode s'entoure d'une au-

---

[1] *Travaux récents en Électricité* (analysés dans l'*Industrie électrique* du 25 décembre 1895).

réole d'un beau vert, tandis que le gaz prend une teinte rouge autour de la cathode. L'intensité des deux colorations augmente graduellement, puis les deux couleurs pénètrent l'une dans l'autre, s'estompent, et finalement la teinte rouge domine dans toute la longueur du tube, montrant qu'il s'est produit une diffusion, et que l'hydrogène participe seul à la décharge. Par moments, une étincelle éclaire le tube en vert dans toute sa longueur, d'où l'on conclut que la décharge a choisi exceptionnellement le chemin du chlore. D'une manière générale, la décharge ne passe, dans toute la longueur du tube, que par l'un des gaz, tout au moins dans la période finale de l'expérience où le mélange des deux composés est assez intime.

» Une autre expérience, dont le résultat est en quelque sorte contraire à celui que nous venons d'indiquer, consiste à introduire d'abord de l'hydrogène pur dans un tube, en vérifiant que son spectre s'y trouve seul, sans aucune trace d'un spectre étranger ; puis à ajouter au contenu du tube une très petite quantité de chlore. Au bout d'un instant, les décharges révèlent la présence du chlore à l'électrode positive, tandis que l'autre ne montre que le spectre de l'hydrogène. En renversant le courant, on voit les spectres se fondre l'un dans l'autre, après avoir brillé pendant quelques secondes d'un vif éclat, et enfin, les gaz ont échangé leurs places respectives par transports opposés. Ce renversement peut se reproduire un nombre de fois indéfini.

» Ces deux expériences, diffusion des produits de l'électrolyse, et transport constant des gaz introduits séparément dans le tube, nous montrent que ces corps existent à deux états différents suivant leur provenance. »

Nous ne chercherons point à caractériser ces deux états;

nous retiendrons seulement, des faits que nous venons d'énumérer, que les corps peuvent être électrolysés, quel que soit leur état d'agrégation, et que, sous certaines influences particulières, les solides sont aisément traversés par des particules matérielles. Les ions libres, en particulier, voyagent sans difficulté au travers des corps les plus imperméables.

SECONDE PARTIE.

CHAPITRE IV.

LES DÉCHARGES DANS LES GAZ, PREMIÈRE PÉRIODE.

14. Phénomènes lumineux dus aux décharges dans les gaz raréfiés. — On doit à Faraday [1] les premières recherches systématiques sur les phénomènes qui accompagnent le passage de l'électricité à travers un gaz sous faible pression.

Ces expériences ont été souvent répétées, avec divers dispositifs, et en employant soit le courant des machines statiques, soit celui de fortes batteries de piles, soit, surtout, les décharges d'induction fournies par les bobines.

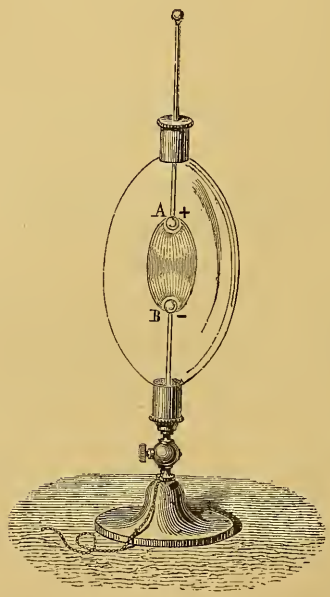
Lorsqu'on met les deux bornes A et B de l'appareil (*fig.* 2) en communication avec une source d'électricité de très haut potentiel, on voit, sous la pression ordinaire, éclater, entre les boules, des étincelles dont la fréquence dépend du débit de la source. Si l'on abaisse graduellement la pression, les étincelles diminuent d'éclat en même

---

[1] Faraday, *Experimental Researches*, 13e série, 1838.

temps que leur fréquence augmente. Peu à peu, elles se transforment en aigrettes d'apparence continue, qui disparaissent à leur tour pour faire place à de simples lueurs entourant les deux pôles. Généralement, ces lueurs sont de couleurs différentes, comme nous l'avons déjà indiqué à

Fig. 2.



propos de l'électrolyse des gaz. Elles se distinguent encore par une autre propriété mise en évidence par Hittorf : la lueur négative communique seule au verre qu'elle rencontre un éclat particulier qui peut être très vif.

Dès l'année 1843, Abria porta son attention sur une particularité de la décharge qui resta longtemps mystérieuse. Dans la plupart des cas, la lueur qui se produit dans le

tube est divisée en strates, équidistants dans les tubes cylindriques. M. Spottiswoode et, après lui, M. Fernet appliquèrent à ce phénomène le procédé d'investigation du miroir tournant, qui permit d'étudier leur mouvement. Il fut ainsi possible de déceler l'apparence stratifiée de la décharge même dans le cas où le tube semblait, à la vue simple, rempli d'une lueur uniforme.

Gassiot observa le même phénomène en se servant d'une pile de 3520 éléments remplis d'eau de pluie. Hittorf, en revanche, le fit disparaître par l'emploi d'une batterie de 1600 éléments Bunsen ([1]). Les divisions du tube reparaissaient lorsqu'on intercalait, dans le circuit, une très forte résistance. Elles devenaient particulièrement nettes lorsqu'un condensateur était mis en dérivation sur le tube. Hittorf en conclut que les stratifications sont dues à des interruptions du courant produites par un défaut de débit de la source.

La même question fut étudiée plus tard par Hertz ([2]), qui a décrit ses expériences dans un Mémoire auquel nous reviendrons au Chapitre suivant. Opérant avec une batterie de 1000 accumulateurs, il reconnut, par plusieurs procédés, que la décharge était parfaitement continue.

L'une des méthodes d'investigation employée par Hertz consistait à mettre simultanément, dans le circuit du tube, un galvanomètre et un électrodynamomètre, que l'on fermait ensuite sur une forte résistance métallique; on ramenait le galvanomètre à sa première indication et l'on

---

([1]) Hittorf, *Ueber die Electricilätsleitung der Gase* (*Annales de Poggendorf*, t. CXXXVI, p. 1; 1869. — *Jubelband*, p. 430; 1874. — *Annales de Wiedemann*, t. VII, p. 553; 1879).

Voir aussi dans les *Annales de Chimie et de Physique* (4e série, t. XVII, p. 487; 1869) l'analyse très étendue du premier Mémoire d'Hittorf, par Bertin.

([2]) Hertz, *Versuche über die Glimmentladung* (*Annales de Wiedemann*, t. XIX, p, 782; 1883).

déterminait celle de l'autre instrument, qui s'est toujours trouvée identique à la déviation mesurée dans le premier circuit. Cette égalité est un indice non douteux de la constance du courant.

Dans d'autres expériences, Hertz plaçait, en dérivation sur le tube, un condensateur dans le circuit duquel un fil métallique était disposé de façon à ce que sa température pût être aisément mesurée. Le fil conserva sa température, d'où l'on conclut qu'il n'était pas traversé par un courant, comme cela se serait produit si la décharge avait été intermittente.

Lorsqu'on augmentait beaucoup la résistance du circuit, on apercevait des stratifications, et, au même instant, le tube commençait à donner un son musical. D'ailleurs, le passage de l'un à l'autre des modes de décharge est brusque, sans aucun état transitoire.

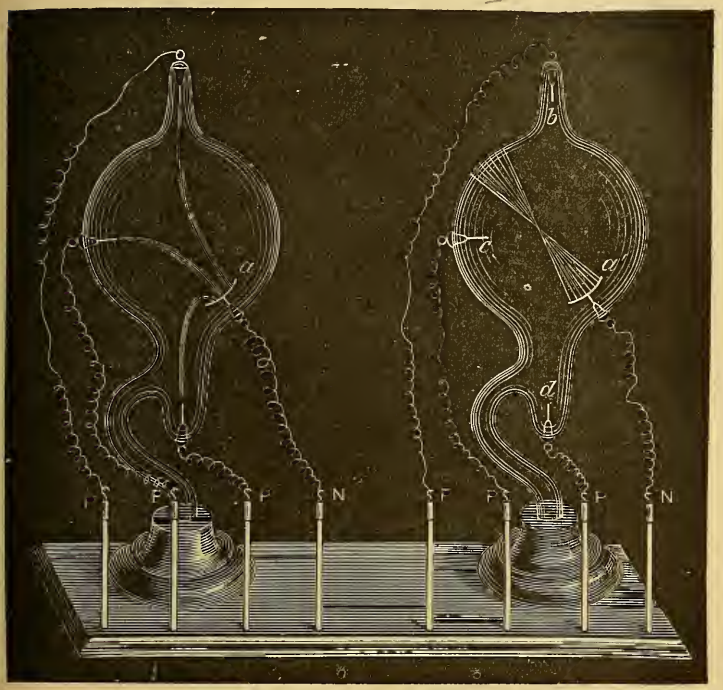
15. Cas des gaz très raréfiés. — C'est aussi à Hittorf que l'on doit les premières recherches sur les décharges dans les gaz sous très faible pression. Mesurant la résistance du circuit par un procédé particulier, il trouva que, au-dessous d'une certaine pression ($0^{mm},5$ pour l'hydrogène), cette résistance ne dépend plus de la distance des électrodes. On observe, en effet, que, pour ces pressions très faibles, la décharge qui reliait auparavant les électrodes part directement de la cathode.

Ce fait est une conséquence nécessaire du phénomène suivant : « La lueur négative est formée de rayons rectilignes, car un corps solide quelconque, isolant ou conducteur, l'interrompt sans l'infléchir et porte ombre sur les parois du tube. Sa direction est indépendante de la position de l'électrode positive. Ainsi, quand l'électrode négative est dirigée en sens contraire de la première, la lueur

bleue ne se recourbe pas pour se tourner vers le pôle positif [1] ».

Cette propriété de la décharge négative est rendue évi-

Fig. 3.



dente à l'aide de l'appareil que représente la *fig.* 3. A gauche, les trois électrodes filiformes sont en communication avec le pôle positif de la source, tandis que l'électrode en forme de cuvette reçoit le courant du pôle négatif. Sous une pression notable, la cathode *a* est reliée aux

[1] Analyse de Bertin.

trois autres électrodes par des traits de lumière, tandis que, si la raréfaction a été poussée très loin, le flux partant de *a'* cesse de se diriger vers *b, c, d;* il s'échappe normalement à la cathode, et forme, sur le verre opposé, une tache lumineuse.

Hittorf a démontré du reste que la cathode joue, dans le phénomène, un rôle prépondérant. La résistance du tube dépend surtout de sa superficie et très peu de celle du pôle positif.

La formation de la lueur négative a donné lieu à de curieuses remarques. Lorsque, par exemple, les deux électrodes sont formées de fils qui débouchent en regard l'un de l'autre dans un étranglement du tube, la décharge se fait de préférence par un conduit latéral, si une portion quelconque des électrodes est comprise dans un espace ouvert communiquant avec ce conduit. Sinsteden et Gassiot avaient déjà observé que l'on fait disparaître la lueur lorsqu'on entoure la cathode d'un tube étroit ouvert vers l'intérieur de l'espace évacué.

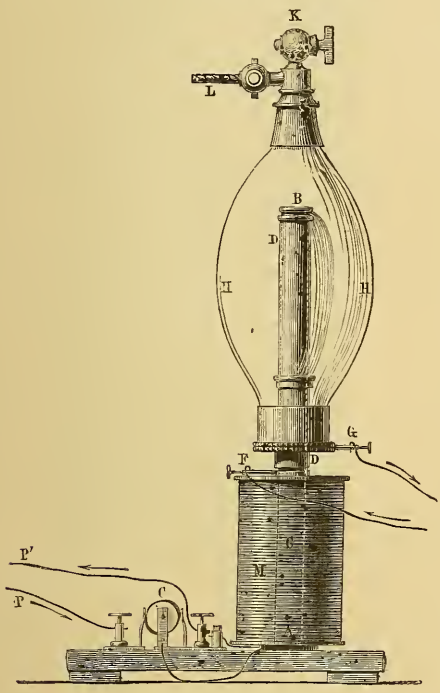
16. Passage de la décharge dans un champ magnétique. — Davy observa, en 1821, que l'arc électrique est sensible à l'action de l'aimant; il prend la forme d'un dard comme celui d'un chalumeau, propriété utilisée, dans ces dernières années, pour diriger l'action calorifique de l'arc vers un point déterminé.

En 1849, A. de la Rive observa la même déviation de la décharge dans les gaz raréfiés; il donna à cette expérience une forme très démonstrative, en plaçant dans l'œuf électrique (*fig.* 4) une tige de fer doux ABC, que l'on aimantait à volonté à l'aide de la bobine M. La tige de fer est entourée, sauf à son extrémité, d'un tube de verre D qui l'isole; le courant d'induction arrive par les bornes F, G,

au fer doux et à un anneau de métal placé à sa base. L'effluve descend alors parallèlement à l'aimant et se met à tourner autour de lui lorsqu'il est excité.

MM. Sarasin et L. de la Rive ont analysé de près le

Fig. 4.



phénomène. Ils ont montré aussi que la nappe lumineuse est capable de produire des actions mécaniques. Si l'on dispose, à l'intérieur de l'œuf, un moulinet à ailettes très mobiles, on le voit prendre un mouvement giratoire sous l'action de celui que l'aimant produit dans la décharge.

Hittorf a étudié le même phénomène dans les gaz très

raréfiés. Il se servait, dans ce but, d'une ampoule sphérique, dans laquelle les électrodes débouchaient à angle droit. Il trouva que la lueur se déplaçait sous l'action de l'aimant, exactement suivant la loi de Laplace.

17. Expériences de M. Crookes. — C'est à M. Crookes que l'on attribue généralement la majeure partie des recherches de la première heure sur les décharges dans les gaz sous très faible pression. La raison de cette opinion réside dans le fait qu'il a donné à plusieurs de ces expériences une forme très propre à frapper l'imagination, et plus encore peut-être à l'idée théorique par laquelle il a cherché à relier les faits qu'il avait étudiés [1].

Nous venons de voir qu'un grand nombre des propriétés de la décharge dans les gaz très raréfiés avaient déjà été découvertes par Hittorf. M. Goldstein, dont nous analyserons plus loin les travaux, a aussi plusieurs antériorités importantes sur M. Crookes. Toutefois, comme, dans cette période de la plus grande production des deux savants physiciens, l'ordre chronologique est assez difficile à établir, nous analyserons successivement leurs travaux les plus importants.

M. Crookes vérifia, par un grand nombre d'expériences, le fait que la décharge s'échappe de la cathode normalement à sa surface; ainsi, dans l'emploi d'une électrode négative cylindrique, la lueur qui frappe le verre (*fig.* 5) se compose d'une nappe limitée aux plans passant par l'axe du cylindre et ses génératrices extrêmes.

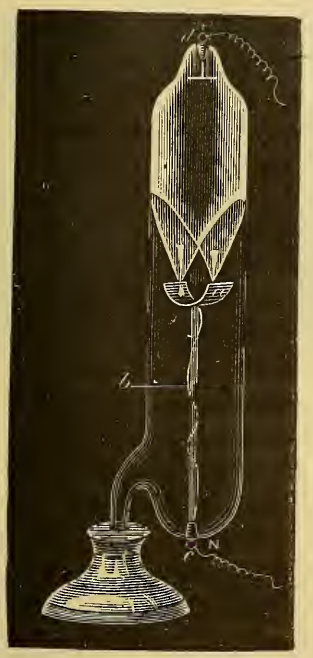
M. Crookes poussa la raréfaction plus loin qu'on ne l'avait fait jusqu'alors et obtint des phénomènes plus nets.

---

[1] L'ensemble des expériences de M. Crookes a été présenté à la Société Royale de Londres et à l'Association Britannique, en 1879. La plupart de ses Mémoires ont été analysés dans le *Journal de Physique*.

Il donna à ses tubes des formes élégantes, très propres aux démonstrations publiques, comme celle de la *fig.* 6, où

Fig. 5.

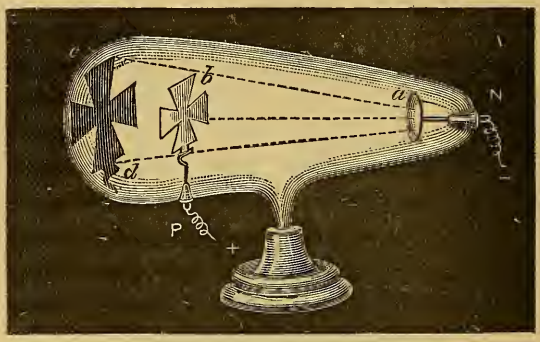


les rayons partis de *a* dessinent sur le fond *c* du tube (l'anticathode, comme le nomment MM. Benoist et Hurmuzescu) l'ombre *d* d'une croix servant d'anode. Pour certaines expériences, il peut être avantageux de rabattre l'anode horizontalement; dans ce but, M. Crookes la fixe à son support par deux anneaux munis d'arrêts.

M. Crookes a trouvé que les rayons échappés de la cathode transportent une notable quantité d'énergie, qu'ils perdent en partie en frappant les obstacles. Ils sont susceptibles de produire une forte élévation de température,

qui, dans le cas où leur foyer est de peu d'étendue, est suffisante pour fondre du platine. Les foyers qui se forment

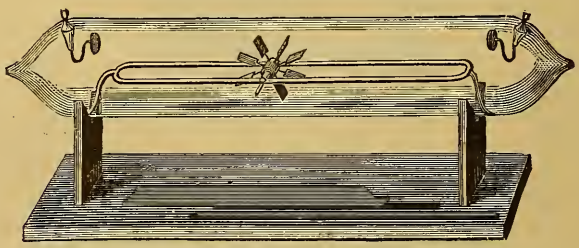
Fig. 6.



sur la surface du verre le ramollissent et mettent le tube rapidement hors d'usage.

La décharge produit directement une action mécanique ; elle met en marche un moulinet porté sur deux

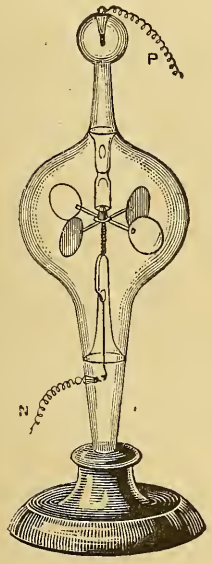
Fig. 7.



paliers de verre (*fig.* 7), et fait même tourner par réaction un moulinet à axe vertical, par les ailettes duquel s'échappe la décharge négative (*fig.* 8) ; il suffit pour cela qu'elles présentent une certaine courbure, ou qu'une de leurs faces soit isolante. Dans l'appareil représenté

dans notre figure, le pôle positif débouche dans une ampoule mise en communication avec celle qui contient le

Fig. 8.



moulinet par une petite ouverture pratiquée dans le support de ce dernier.

Les effets lumineux découverts par M. Crookes sont parmi les plus frappants qu'il ait constatés. Dirigeant la décharge négative sur un certain nombre de corps phosphorescents, des sulfures alcalino-terreux, des cristaux, tels que le rubis ou le diamant, il leur communiqua un vif éclat indépendant du reste de leur température.

C'est dans la direction de ces dernières expériences de M. Crookes que M. Tesla et, après lui, plusieurs physiciens ont cherché la solution pratique de l'éclairage rationnel, par la production d'ondes uniquement lumineuses. A l'aide d'appareils spécialement étudiés en vue d'un grand rende-

ment, M. Tesla a fait entrevoir la possibilité d'obtenir, par les procédés de M. Crookes, une lumière parfaitement appropriée aux besoins de l'éclairage.

18. Idées de M. Crookes. — Comme nous venons de le dire, les recherches de M. Crookes ont été guidées par une théorie précise, devenue rapidement populaire sous le nom de *Théorie du bombardement.*

L'éminent physicien pense que, dans le vide très poussé qu'il obtient dans ses tubes, les molécules gazeuses possèdent un degré de liberté suffisant pour que l'on puisse les envisager comme complètement indépendantes les unes des autres. Le vide parfait est isolant, comme l'avait déjà démontré Masson; les recherches les plus récentes n'ont pu, du reste, que confirmer ce résultat déjà ancien; et, puisque la présence d'une petite quantité de matière est nécessaire à la conduction de l'électricité, M. Crookes en conclut que cette matière en est le support, et que la déperdition de l'électricité à la cathode est convective. Les molécules gazeuses sont attirées par l'électrode, se chargent et sont repoussées. L'élévation de température qui se produit au foyer de l'électrode est due au choc des particules, qui perdent, au contact, une partie de leur énergie cinétique.

La déviation par l'aimant achève de corroborer la théorie de M. Crookes; on sait, en effet, qu'un corps électrisé, animé d'un mouvement rapide, agit comme un courant, et se comporte de même sous l'action d'un aimant.

M. Crookes a exposé ses idées dans une lettre adressée à Sir G.-G. Stokes, alors secrétaire de la Société Royale de Londres. Il nous semble intéressant d'en transcrire les passages les plus saillants [1] :

---

[1] Crookes, *On a forth State of Matter* (*Proc. roy. Soc.*, t. XXX, p. 469; 1880).

« Considérons une molécule isolée dans l'espace. Est-elle solide, liquide ou gazeuse? Solide, elle ne peut pas l'être, parce que l'idée de solidité entraîne certaines propriétés qui n'existent pas dans la molécule isolée [1]. En réalité, une molécule seule est une entité inconcevable, soit que nous essayions, comme Newton, de nous la représenter comme un corpuscule sphérique dur, soit que nous la considérions avec Boscovich et Faraday comme un centre de force, soit enfin que nous adoptions l'atome tourbillon de Sir William Thomson. Mais, si la molécule individuelle n'est pas solide, *a fortiori* elle ne peut pas être considérée comme liquide ou gazeuse, car ces deux états résultent de chocs intermoléculaires plus encore que l'état solide. La molécule individuelle, par conséquent, doit être classée pour son propre compte dans une catégorie spéciale.

» Le même raisonnement s'applique à un nombre quelconque de molécules contiguës, pourvu que leur mouvement soit dirigé de sorte qu'il ne se produise aucune collision.

»... Un souffle moléculaire peut toujours être envisagé comme le résultat du mouvement de molécules isolées, de la même manière que la décharge d'une mitrailleuse consiste en projectiles séparés.

» La matière, dans son quatrième état, est le résultat ultime de l'expansion des gaz; en raison de l'extrême raréfaction, la trajectoire libre des molécules est allongée au

---

[1] Cette assertion de M. Crookes n'est peut-être pas parfaitement exacte. La théorie de l'association moléculaire, développée dans ces derniers temps surtout par M. Ramsay, admet, au contraire, que la molécule isolée peut varier en grandeur et former des conglomérats plus ou moins complexes; la molécule moyenne différerait suivant la température et l'état du corps; il se peut que la molécule isolée conserve cette propriété à un degré atténué; elle sera ainsi, par elle-même, apte à former, avec d'autres molécules de même espèce, un corps solide, liquide ou gazeux.

point que les chocs deviennent négligeables en comparaison du parcours total, et la plupart des molécules peuvent alors suivre leur propre mouvement sans être dérangées; si le chemin moyen est comparable aux dimensions du vase, les propriétés qui constituent l'état gazeux sont réduites à un minimum et la matière atteint l'état ultragazeux.

» Mais le même état de choses peut être obtenu si, par un moyen quelconque, nous isolons une quantité limitée de gaz et si, par une force extérieure, nous introduisons de l'ordre dans les mouvements apparemment désordonnés des molécules dans toutes les directions. J'ai montré qu'il en était ainsi dans les phénomènes produisant la rotation du radiomètre, et j'ai rendu ces mouvements visibles dans mes dernières recherches sur la décharge négative dans les tubes à vide. Ces considérations conduisent à une spéculation singulière ; la molécule est la seule vraie *matière,* et ce que nous nommons matière n'est pas autre chose que l'effet sur nos sens du mouvement des molécules, ou, comme l'exprime John Stuart Mill, *une permanente possibilité de sensation.* »

19. Expériences de M. Goldstein. Ses objections. — Les premières publications de M. Goldstein sur le sujet qui nous occupe datent de 1871 ; il est revenu à plusieurs reprises sur la question des décharges dans les gaz très raréfiés, notamment en 1876, avant les premières publications de M. Crookes dont il combattit les conclusions dans des travaux ultérieurs ([1]).

M. Goldstein a résumé ses premières recherches dans

([1]) *Voir*, en particulier, le Mémoire d'ensemble de M. Goldstein, inséré dans les *Monatsberichte* de l'Académie de Berlin (janvier 1880).

une série de propositions dont voici les principales :

La production de la lumière par les rayons électriques partis du pôle négatif dans un gaz très raréfié n'a lieu que lorsque ce rayon rencontre un obstacle solide.

Cette lumière ne se produit que lorsque le rayon est intercepté par l'obstacle.

Ainsi, un écran phosphorescent introduit dans le pinceau des rayons parallèlement à sa propagation ne donne aucune lueur appréciable.

La cause de la production de la lumière est purement optique (1).

Cette conclusion est déduite de l'identité de couleur que prennent les corps les plus divers soumis au « rayon électrique » et à la lumière du soleil ou à une source quelconque riche en radiations ultra-violettes.

Le caractère optique de ces radiations est confirmé, suivant M. Goldstein, par leur action photochimique ; ils noircissent le papier photographique, et agissent de même sur le bichromate de potasse, le chlorure d'argent et l'oxalate de fer.

La transformation de l'extrémité des rayons se produit non seulement lorsqu'ils frappent la paroi fluorescente, mais en quelque endroit qu'ils rencontrent une substance solide.

Ainsi, le quartz ou le mica, qui ne deviennent pas lumineux sous l'action des rayons, rendent lumineux, par leur radiation, les corps phosphorescents placés dans leur voisi-

(1) N'oublions pas que le Mémoire de M. Goldstein a été écrit avant que la théorie électromagnétique de la lumière fût populaire. Le mot « *optique* » est employé ici dans un sens restreint.

nage, dès qu'ils coupent un faisceau de rayons électriques.

Enfin, en ce qui concerne la nature optique du phénomène : « *Il n'est pas douteux que, avec la lumière positive ou la lumière négative, nous avons affaire à une transformation de radiations très réfrangibles dont les vibrations sont changées en vibrations plus lentes, comme dans le phénomène de la phosphorescence et de la fluorescence.* Des expériences antérieures ayant montré que l'éclat des corps solides excédait la durée de l'excitation, j'ai été conduit à admettre que les apparences observées étaient dues au premier de ces phénomènes, et non au second, comme je l'avais dit d'abord. Parmi les nombreuses substances soumises à l'expérience, il n'en est aucune qui se soit montrée transparente aux radiations électriques, même sous une épaisseur aussi faible que possible. Ni des lames très minces de verre, ni des lames de spath ou de quartz, que M. Mascart a trouvées si transparentes pour les radiations très réfrangibles, n'ont laissé passer la moindre trace de ces rayons.

» La paroi d'un tube qui montrait une vive phosphorescence sous l'action des rayons fut recouverte de collodion à l'aide d'une goutte d'une solution éthérée très étendue. Même cette couche, dont l'épaisseur ne dépassait pas quelques centièmes de millimètre, projetait sur le verre une ombre noire comme de l'encre, tout comme si elle avait été formée d'une substance métallique opaque. Sans qu'il me soit possible de donner des valeurs numériques, on peut conclure de ces expériences que la limite des radiations éthérées que l'on peut qualifier de lumière est au-dessous de celle qu'avait déjà indiquée M. Fizeau. »

On comprendra sans peine le grand intérêt que présentent les expériences de M. Goldstein. Ces propriétés de la lumière cathodique, qui sont traitées souvent dans son

Mémoire au point de vue purement descriptif, deviennent très caractéristiques, considérées avec nos idées actuelles. On conviendra qu'il a frôlé de près la découverte toute moderne des applications pratiques de ces radiations.

Déjà en 1876, M. Goldstein avait étudié les ombres portées par les obstacles situés sur le trajet des rayons, et montré que, si ces écrans sont reliés à la terre ou à la cathode par un fil de très forte résistance, leur ombre s'élargit; il attribue ce phénomène à la répulsion qu'exerce la cathode sur les rayons cathodiques.

Dans un Mémoire d'ensemble publié postérieurement à ceux de M. Crookes, M. Goldstein apporte de nombreuses expériences dont le résultat semble nettement opposé aux idées du physicien anglais. Nous retiendrons deux arguments particulièrement importants; le premier est tiré de la théorie des gaz. Dans un tube de 90^{cm} de longueur, dans lequel la pression est de l'ordre du centième de millimètre, la paroi anticathodique brille encore d'un vif éclat. La théorie cinétique enseigne que le chemin moyen des molécules dans le tube en question était d'environ 6^{mm}. Le bombardement se serait donc propagé à une distance 150 fois plus grande que le parcours libre moyen. Or, la probabilité qu'une seule molécule traverse cet espace est de l'ordre de 10^{-65}; elle est pratiquement nulle, si grand que soit le nombre des molécules contenues dans le tube. C'est probablement à cette objection que répondait M. Crookes dans la lettre dont nous avons donné quelques extraits, lorsqu'il disait que l'on peut produire artificiellement un état semblable à celui des molécules isolées en donnant au mouvement moléculaire une direction déterminée.

M. Goldstein conteste, du reste, la généralité du fait indiqué par M. Crookes, que les rayons s'échappent tou-

jours normalement à la cathode. On peut, en effet, déplacer le foyer d'une cathode en forme de calotte sphérique, en intercalant des étincelles dans le circuit extérieur.

Un autre argument de M. Goldstein est tiré du fait que les rayons cathodiques ne présentent pas à un degré appréciable le phénomène de Doppler, c'est-à-dire le déplacement des raies spectrales qui est une conséquence nécessaire du mouvement des corps lumineux. Lord Kelvin [1] a répondu beaucoup plus tard à cette objection par un calcul approché, d'où il conclut que la vitesse des particules gazeuses, dans l'hypothèse de Crookes, est trop faible pour donner lieu à un déplacement mesurable.

Des expériences, sur lesquelles nous reviendrons, ont montré que le calcul de Lord Kelvin, basé sur l'estimation de l'énergie perdue par les rayons sur les parois du tube, est certainement erroné; il avait fait entrer dans ce calcul la masse entière du gaz contenu dans le tube; nous verrons, au contraire (**21**), que le rayon cathodique ne forme qu'une faible partie de la décharge; les vitesses réelles des rayons sont ainsi très supérieures à celles que l'illustre physicien avait admises; nous verrons toutefois que la critique de M. Goldstein n'est pas sans réplique. Pour le moment, nous abandonnerons la discussion pour la reprendre lorsque nous aurons décrit d'autres phénomènes découverts ultérieurement.

M. Goldstein est revenu fréquemment à ses études sur le phénomène cathodique. Il a vérifié, dans un nouveau travail, la diffusion des rayons frappant une surface quelconque, conductrice ou isolante, faisant ou non partie d'un circuit électrique; il a montré que, dans tous les cas, ces

---

[1] *On the velocity of Crookes' cathode stream* (*Proc. roy. Soc.*, t. LII, p. 331; 1892).

rayons réfléchis sont susceptibles de produire de la phosphorescence sur les corps qu'ils frappent [1]. Toutefois, on voit, d'après le titre du Mémoire de M. Goldstein, qu'il considérait le phénomène comme une simple *réflexion diffuse,* et non comme une *transformation* de rayons d'une certaine espèce en une radiation d'un genre tout différent.

Nous dirons, en terminant, que M. Goldstein a étudié le phénomène des rayons électriques en insérant dans un tube cylindrique une cathode qui le fermait exactement et portait un certain nombre de petites ouvertures; il a trouvé plusieurs différences importantes entre les radiations du côté de l'anode et celles qui se produisaient dans la partie opposée du tube.

---

[1] E. Goldstein, *Ueber die Reflexion elektrischer Strahlen* (*Monatsberichte* de Berlin. 1881, p. 775).

CHAPITRE V.

LES DÉCHARGES DANS LES GAZ, DEUXIÈME PÉRIODE.

20. Coup d'œil sur la théorie des phénomènes. — Dans ses premiers Mémoires, Hittorf s'était tenu éloigné de toute discussion concernant la cause des faits qu'il avait découverts. Avec M. Crookes et M. Goldstein, la théorie se dessine et la lutte commence aussitôt.

Les expériences ont montré que quelque chose part de la cathode; le fait est incontestable. Mais, là, les opinions se bifurquent. Selon M. Crookes, l'agent mis en mouvement est matériel, tandis que, suivant M. Goldstein, il est une forme de l'énergie. On trouve parfois un bon argument pour l'une de ces deux opinions, mais les objections sont plus nombreuses encore. Cependant M. Crookes a une bonne avance. Son idée est précise, celle de ses adversaires n'est encore que vaguement dessinée. La source de matière n'est pas difficile à découvrir dans le tube. Il contient toujours un peu de gaz sans lequel le courant ne passe pas; et le tube une fois excité, la cathode fera au besoin tous les frais de l'expérience, puisque la lumière ultra-violette dont le tube est rempli la pulvérise abondamment.

D'autres faits, découverts par M. Goldstein, et que nous avons rapportés dans le précédent Chapitre, cadrent moins

bien avec les idées de M. Crookes. Nous allons voir les difficultés s'amonceler autour d'elles. L'habile et patient labeur de plusieurs physiciens allemands, parmi les plus distingués, les bat en brèche à toute occasion.

La théorie énergétique du phénomène se précise. En 1883, nous voyons apparaître, dans un Mémoire de M. E. Wiedemann [1], l'hypothèse que les *rayons cathodiques*, comme on les nommera désormais, sont composés de radiations de très faible longueur d'onde. Plus tard, M. Lenard vient à cette idée, qu'il exprime d'une façon plus dubitative, en disant que ces rayons se comportent, vis-à-vis de la molécule, comme les radiations lumineuses par rapport à un milieu trouble; il laisse ainsi le lecteur compléter sa pensée en réduisant simultanément, et dans la même proportion, la longueur d'onde et le milieu ambiant à des dimensions beaucoup plus faibles.

Désormais, on aura une nouvelle base de discussion, et la théorie énergétique du phénomène pourra, à son tour, être attaquée sous une forme tangible.

On ne possède en réalité qu'un argument bien positif contre la théorie purement optique du phénomène : c'est la déviation des rayons cathodiques par l'aimant, mais cette seule propriété, complètement isolée, suffit pour rendre cette théorie fort douteuse.

C'est en grande partie pour cela que l'on vient, timidement d'abord, puis avec plus d'insistance, à l'idée de la vibration longitudinale de l'éther; ici, le terrain est neuf, et l'on peut disposer encore d'un nombre suffisant de coefficients pour donner à cette vibration plusieurs des propriétés des rayons cathodiques.

---

[1] E. Wiedemann, *Ueber electrische Entladungen in Gasen* (*Annales de Wied.*, t. XX, p. 756; 1883). — E. Wiedemann et H. Ebert, *Electrische Entladungen in Gasen und Flammen* (*Ann. de Wied.*, t. XXXV, p. 209; 1888).

Cependant, dès le début, une idée nouvelle se fait jour, dont l'importance ne fera que grandir.

M. J.-J. Thomson fonde la théorie de la décharge dans les tubes sur l'hypothèse de la dissociation du gaz [1].

L'énergie du champ électrique est absorbée par les molécules qui se transforment en ions libres et dissipent les charges électriques. Les relations connues entre la pression et la dissociation conduisent à penser que la conductibilité doit d'abord augmenter avec la première dilution du gaz; puis, lorsque les molécules existant dans le champ ne suffisent plus pour épuiser son énergie, la résistance augmente de nouveau pour devenir infinie dans le vide parfait. Cette théorie s'adapte très exactement aux faits d'expérience les plus évidents, et suffira pour en expliquer d'autres d'une nature plus délicate.

Cette théorie de M. J.-J. Thomson est bien d'accord avec une expérience relatée par Hertz, d'après laquelle la chaleur développée dans les tubes à vide est proportionnelle à l'intensité du courant, et non à son carré. L'éminent professeur de Cambridge pense, en effet, que le développement de chaleur est dû à la recombinaison des ions dissociés, dont le nombre est évidemment proportionnel à l'intensité du courant.

Nous marquerons au passage plusieurs faits d'une grande importance théorique, dans le résumé que nous allons essayer de donner des recherches de la deuxième période, celle de la lutte entre les deux théories.

21. Les actions électromagnétiques et électrostatiques des rayons cathodiques; réciprocité. — Dans les idées de

---

[1] J.-J. Thomson, *On a theory of the electric discharge in gases* (*Philosophical Magazine*, 5e série, t. XV, p. 427; 1883).

M. Crookes, l'action d'un champ magnétique sur les rayons cathodiques est identique à l'effet Rowland, dans lequel une particule électrisée animée d'un mouvement rapide agit comme un courant électrique (3). Si tel est le cas, il semble que l'action doive être réciproque.

L'action inverse des rayons sur un aimant a été étudiée d'abord par Hertz, à l'aide du dispositif suivant [1]. Dans un tube cylindrique, la cathode est percée en son centre, situé sur l'axe du cylindre; elle est traversée par un tube de verre contenant le fil positif qui en débouche au ras de la cathode. Dans ces conditions, les rayons cathodiques se produisent comme à l'ordinaire, normalement à l'électrode négative, tandis que, s'il existe un courant entre les pôles, il est centré sur l'axe du tube, et se ferme complètement de manière à n'exercer aucune action magnétique à l'extérieur. Un petit aimant, suspendu auprès du tube, dans le voisinage du passage des rayons cathodiques, n'éprouve aucune action mesurable, tandis qu'il accuse immédiatement une forte déviation si l'on prend comme anode un fil situé dans la portion du tube opposée à la cathode.

Hertz chercha ensuite à déterminer la marche du courant dans un conducteur à deux dimensions. Il construisit, pour cela, un tube plat, sorte de caisse, au-dessus de laquelle il traça les lignes de courant à l'aide d'un aimant très court, presque astatique, suspendu en un point fixe, tandis que l'on déplaçait le tube dans deux directions horizontales. Il obtint ainsi des courbes qui représentaient, pour plusieurs positions respectives des électrodes, les lignes de propagation de l'électricité. Dans tous les cas, l'anode était placée latéralement par rapport à la cathode, d'où

---

[1] HERTZ, *Versuche über die Glimmentladung* (*Annales de Wiedemann*, t. XIX, p. 782; 1883).

les rayons émergeaient normalement. Il trouva que les lignes de propagation croisent en tous sens les rayons, et que ceux-ci ne peuvent être envisagés comme les points de passage du courant. Hertz en conclut que la déviation des rayons, qu'il considère aussi comme dus à une vibration, tient à une modification de l'espace dans lequel ils se propagent, et nullement à une action directe de l'aimant.

On contournerait cette conclusion en admettant que les rayons ne forment qu'une petite partie de la décharge; remarquons toutefois que le résultat de Hertz est en contradiction avec celui de Hittorf, qui avait trouvé dans les tubes une résistance indépendante de la distance des électrodes, dès que se forment les rayons cathodiques (**15**).

D'ailleurs, suivant Hertz, les rayons ne deviennent visibles que lorsque le mouvement auquel il les attribue rencontre une substance quelconque; enfermant, dans un tube, une goutte de mercure, il la vaporise de façon à arrêter les rayons par un milieu gazeux relativement dense; or, partout où les rayons rencontrent la vapeur, il se dégage une vive lueur qui pénètre seulement à une faible profondeur dans ce nouveau milieu.

Quelle peut être la modification du milieu éthéré invoquée par Hertz? Il a été bien difficile de le dire jusqu'ici, et c'est là, comme nous l'avons vu, le point vulnérable de la théorie énergétique du rayon.

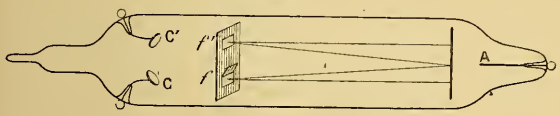
L'action du champ a été soumise à une étude approfondie par M. Lenard; nous ne séparerons point cette question de l'ensemble de ses recherches sur les rayons cathodiques, dont nous rendrons bientôt compte (**22**).

M. Crookes avait conclu de ses recherches à une répulsion des rayons cathodiques parallèles, ce que l'on pouvait attribuer à un effet électrostatique des particules électrisées, supérieur à leur effet électrodynamique. Dans un

tube cylindrique, muni à une extrémité de deux cathodes, M. Crookes avait placé un écran de mica percé de deux fenêtres s'ouvrant en regard des cathodes; l'appareil était monté de telle sorte que, lorsqu'on les produisait séparément, les deux rayons venaient couper l'axe du tube près de l'extrémité où se trouvait l'anode. Lorsque, au contraire, on actionnait simultanément les deux cathodes, les deux rayons se redressaient et parcouraient le tube parallèlement à son axe.

MM. Wiedemann et Ebert (¹) ont eu l'idée de disposer, devant l'une des fenêtres, un petit volet que l'on pouvait ouvrir ou fermer à volonté (*fig.* 9). L'expérience montra

Fig. 9.



que le rayon passant par la fenêtre *f'* n'était nullement influencé par le passage de l'autre rayon. Que la fenêtre *f* fût ouverte ou fermée, sa direction ne dépendait que de l'excitation de la deuxième cathode C. On en conclut que la répulsion des rayons n'existe pas à un degré appréciable, et que le phénomène se borne à une réaction exercée par la cathode sur un rayon quelconque, émané d'elle-même ou d'une autre électrode négative. Sous cette forme, le phénomène avait déjà été décrit par M. Goldstein (**19**).

22. Les expériences de M. Lenard (²). — Les expériences

(¹) E. Wiedemann et H. Ebert, *Ueber die angebliche Abstossung paralleler Kathodenstrahlen* (*Annales de Wiedemann*, t. XLVI, p. 158; 1892).

(²) Ph. Lenard, *Ueber Kathodenstrahlen von atmosphärischem Druck, und im äussersten Vacuum* (*Annales de Wiedemann*, t. LI, p. 225; 1894). — *Ueber die magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen* (*Ibid.*, t. LII, p. 23

exécutées à Bonn par M. Ph. Lenard forment l'ensemble le plus important de recherches de la seconde période. Un nouveau moyen d'investigation avait été découvert par Hertz; alors que M. Goldstein avait cru pouvoir conclure de ses recherches que les corps, sous la plus faible épaisseur, étaient opaques aux rayons cathodiques, Hertz reconnut que ces derniers traversent des épaisseurs appréciables de divers métaux [1]. Ainsi, un morceau de verre d'urane, recouvert, du côté de la cathode, par une feuille d'or, présente les phénomènes de phosphorescence avec une intensité au moins égale à celle qu'on observe sans la feuille d'or; les rayons cathodiques peuvent, en effet, n'être que très peu affaiblis au passage du métal, tandis que la lumière engendrée dans le verre s'y réfléchit en majeure partie et produit un renforcement de l'éclat. De petits fragments de mica collés sur la feuille d'or projettent une ombre intense, mais qui se diffuse dans le verre. On rapproche avec intérêt cette transmission diffuse des rayons cathodiques de leur réflexion diffuse découverte par M. Goldstein (**19**). Nous en trouverons plus loin la cause probable.

Cette découverte de la perméabilité de minces feuilles de métal pour les rayons cathodiques permit à M. Lenard de séparer entièrement l'étude des rayons des conditions de leur production. Fermant un tube par un septum métallique, il en fit sortir les rayons cathodiques, qu'il put étudier dans divers milieux, tandis que, jusque-là, ils étaient liés à un espace fortement évacué.

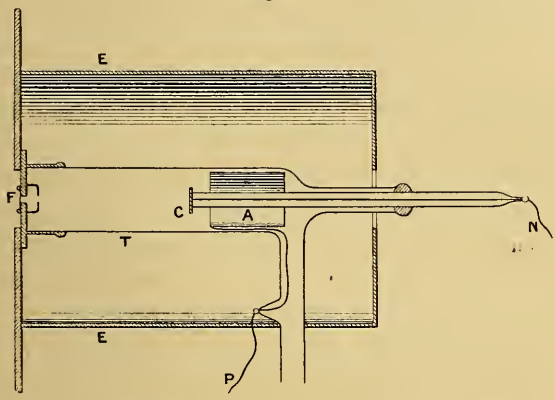
La *fig.* 10 représente le premier appareil de M. Lenard.

1894). — *Ueber die Absorption der Kathodenstrahlen* (*Ibid.*, t. LVI, p. 255; 1895). — *Voir* aussi l'analyse que nous avons donnée des travaux de M. Lenard dans *la Nature* (n° 1104; 28 juillet 1894).

[1] H. Hertz, *Ueber den Durchgang der Kathodenstrahlen durch dünne Metallschichten* (*Annales de Wiedemann*, t. XLV. p. 28; 1892).

La cathode circulaire C est placée dans l'axe du tube; l'anode est composée d'un cylindre A, centré de même sur le tube; elle est située en retrait de la cathode. Le tube T lui-même n'est plus scellé, comme dans les précédentes recherches ; il est fermé par une armature percée en son centre d'une fenêtre F de $1^{mm},7$ de diamètre, sur laquelle

Fig. 10.



on a collé une feuille d'aluminium de 3^{μ} d'épaisseur. Une capsule disposée à l'intérieur de l'armature protège la fenêtre contre les actions électrostatiques; l'appareil entier est enfermé dans une caisse en métal E, en contact avec l'armature, et mise à la terre.

Avec ce dispositif, il est aisé de reconnaître que les rayons sortent du tube par la fenêtre et se répandent dans l'atmosphère, où leur présence se révèle par les actions phosphorescentes déjà connues [1], et par plusieurs autres qu'il est désormais aisé de découvrir.

Pour l'étude optique du parcours des rayons, M. Lenard

[1] La fenêtre elle-même devient luminescente, dès qu'il s'est formé un peu d'alumine à sa surface.

se sert d'un écran de papier de soie enduit de pentadécylparatolylcétone; ce sel donne une belle luminescence verte sans résidus appréciables; l'écran permet de reconnaître que les rayons se répandent dans l'air à plusieurs centimètres de la fenêtre, en une radiation fortement diffusée. Un grand nombre d'autres corps deviennent lumineux dans les mêmes conditions, et les expériences, qui peuvent maintenant s'étendre aux liquides, montrent la belle luminescence bleue du pétrole.

Les actions photographiques des rayons, que M. Goldstein avait déjà reconnues, se révèlent très énergiques; à une petite distance de la fenêtre, le papier sensible se noircit comme à la lumière d'un soleil légèrement voilé. Le nouveau dispositif permet enfin à M. Lenard de découvrir une action encore inconnue des rayons : le pouvoir de décharger rapidement les corps électrisés. Un électroscope placé dans le voisinage de la fenêtre se décharge instantanément, et l'action est encore sensible à 30^{cm} de l'appareil.

Le procédé d'investigation employé de préférence par M. Lenard était le procédé optique; moins sensible peut-être que les deux autres, il présente l'avantage d'être instantané. On observe, en effet, que, sous l'action des décharges, les tubes se modifient en un temps plus ou moins long, et il est indispensable, pour les mesures comparatives, de se servir d'un tube non altéré. Dans les expériences de mesure, M. Lenard n'opérait que pendant quelques secondes, ce qui, joint à l'exiguïté de sa fenêtre, l'a empêché de constater les effets surprenants découverts plus tard par M. Röntgen.

M. Lenard recommande aussi de mettre, en dérivation sur le tube, un excitateur à étincelles, qui permet de contrôler le degré d'évacuation par la distance explosive. Les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque cette distance

était de 3^{cm}. D'ailleurs, le tube n'était jamais séparé de la pompe à mercure, de telle sorte que l'on pouvait revenir aux conditions initiales après chaque série d'expériences.

L'emploi de l'écran luminescent exige certaines précautions. S'il n'est pas protégé, du côté du tube, par un corps opaque, la phosphorescence de l'air, que l'on observe à travers le papier de soie, fausse le résultat. C'est pourquoi M. Lenard recouvrait son écran, vers l'arrivée des rayons, d'une mince feuille d'aluminium complètement opaque à la lumière ordinaire. Il attribue à cette précaution la précision de ses résultats.

Nous avons vu que M. Goldstein avait trouvé complètetement opaque aux rayons cathodiques une mince pellicule de collodion. M. Lenard pense que ce résultat négatif est attribuable à l'abondance de la lumière dans le tube, qui masquait les faibles radiations émanées du verre à l'abri du collodion.

Outre l'appareil que nous venons de décrire, M. Lenard a construit deux autres tubes pour l'observation des rayons dans des milieux divers.

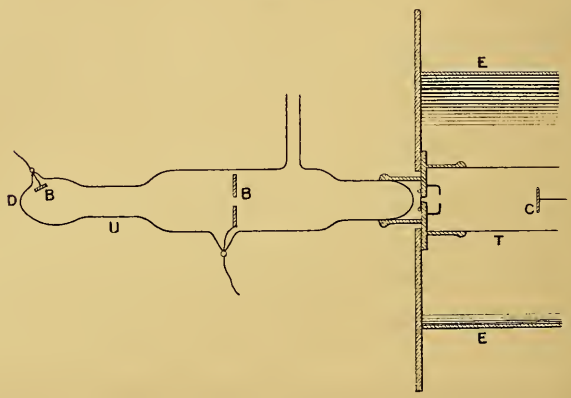
L'un d'eux, U (*fig.* 11), destiné aux observations dans un vide très parfait, portait des électrodes BB servant à contrôler la pression par la résistance du gaz restant dans le tube. Il fut mastiqué en regard de la fenêtre du tube producteur, et permit de déterminer les lois de la propagation des rayons dans des conditions absolument indépendantes de leur nature.

Muni de ces appareils, M. Lenard a d'abord étudié l'absorption des rayons dans divers gaz; il put constater qu'ils se propagent dans le vide aussi parfait que puissent le produire les pompes à mercure, en prenant la précaution de condenser encore les vapeurs mercurielles par un mélange réfrigérant. Dans ces conditions, la production des rayons

est impossible, et M. Lenard en conclut qu'ils sont complètement indépendants de la matière gazeuse, puisqu'ils peuvent en être séparés.

La tache luminescente D était encore parfaitement nette à plus de 1^{m} de la fenêtre, et correspondait exactement à la

Fig. 11.



projection de l'ouverture de l'écran, la fenêtre étant le point d'émission.

Voici quelques-uns des résultats de M. Lenard, pour des rayons de même nature [1] :

---

[1] Soit i_0 l'intensité des rayons dans un milieu non absorbant à une distance 1 de la source. Dans un milieu absorbant, l'intensité à la distance r sera

$$i = i_0 \frac{e^{-ar}}{r^2}.$$

M. Lenard déterminait la distance R pour laquelle l'intensité I donnait une luminescence perceptible. La quantité $\frac{i_0}{I}$ étant considérée comme constante, on l'élimine à l'aide de l'équation relative au vide

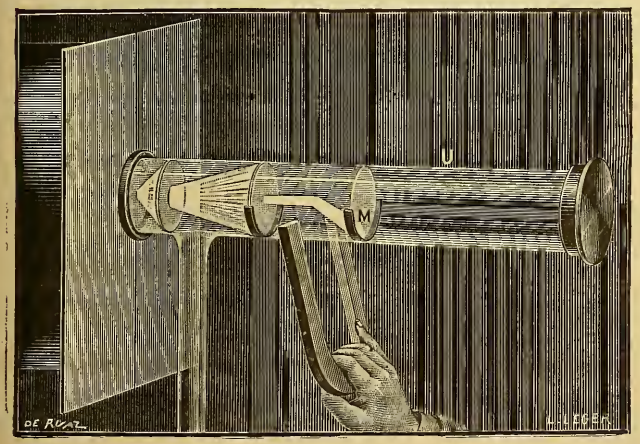
$$I = \frac{i_0}{R^2}$$

On trouve alors a, en cm^{-1}, les longueurs étant exprimées en centimètres.

	Pression. mm	Pouvoir absorbant.	Masse spécifique.		Quotient.
Hydrogène	3,30	0,00149	0,368	10^{-6}	4040
Air	0,78	0,00416	1,25		3330
Hydrogène	760 »	0,476	84,9		5610
Air	760 »	3,42	1,23	10^{-3}	2780
Anhydride sulfureux	760 »	8,51	2,71		3110
Collodion		3310	1,10		3010
Papier		2690	1,30		2070
Verre		7810	2,47		3160
Aluminium		7150	2,70		2650
Mica		7250	2,80		2590
Feuille de clinquant		23800	8,90		2670
Argent		32200	10,5		3070
Or		55600	19,3		2880
			Moyenne		3200

Les nombres de la dernière colonne sont remarquablement concordants, étant donnée surtout l'incertitude iné-

Fig. 12.



vitable des observations. L'hydrogène seul possède un pouvoir absorbant relatif plus grand que les autres corps

examinés par M. Lenard. A cette exception près, on peut dire, avec une assez grande approximation, que le pouvoir absorbant des corps pour ces rayons, que nous nommerons encore cathodiques, est proportionnel à leur masse spécifique.

L'action du champ magnétique a donné lieu à des observations non moins intéressantes. Dans l'appareil qui a servi à ces recherches (*fig.* 12), le rayon, à sa sortie de la fenêtre, était limité dans le tube U par deux écrans successifs, et traversait le champ magnétique après son passage à travers l'ouverture du second. Les mesures préliminaires sur la tache lumineuse M ont été faites à l'aide de l'appareil que représente notre figure ; dans des recherches plus précises, le récepteur était placé contre l'une des parois du tube, et portait une échelle divisée.

La *fig.* 13, reproduite en fac-simile d'après le Mémoire de M. Lenard, représente quelques-unes de ses observations. On voit, dans la colonne de gauche, A, une série de taches produites sur le récepteur par des rayons non déviés. Au centre d'un halo diffus, se distingue un contour parfaitement limité, à l'intérieur duquel la lumière, représentée ici en noir, est particulièrement intense et à peu près uniforme. Deux de ces taches n'ont aucun halo.

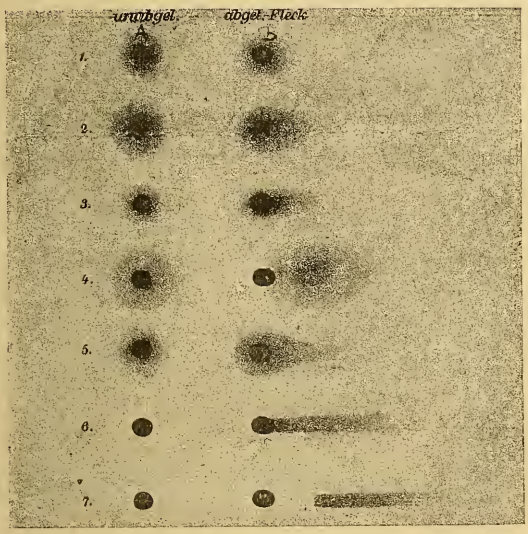
La seconde colonne, B, montre le phénomène après le passage des rayons dans le champ magnétique. Ces taches présentent une particularité remarquable. Le halo seul est dévié, la lumière nettement délimitée n'est pas affectée par l'aimant. Parfois, la lumière diffuse se sépare entièrement de la tache; on peut même la faire apparaître là où rien ne la décelait dans l'image non déviée.

M. Lenard conclut de ces expériences que la diffusion et la déviation sont deux propriétés communes aux mêmes rayons, et que ceux-ci peuvent les posséder à des degrés très divers. Il semble toutefois y avoir une démarcation

bien tranchée entre des rayons possédant ces deux propriétés à un degré quelconque, et les rayons ne les possédant pas du tout. Nous discuterons plus loin cette idée.

Dans son premier Mémoire, M. Lenard décrit l'expérience suivante, qui prend aujourd'hui une grande importance :

Fig. 13.



une plaque sensible était disposée *dans une boîte d'aluminium entièrement fermée ;* sa moitié de droite était couverte d'une mince feuille d'aluminium, sa moitié inférieure, d'une lame de quartz de $0^{mm},5$, de sorte que le quart inférieur droit était protégé par les deux écrans.

On put constater que l'aluminium ne projetait qu'une ombre très faible ; le quartz, au contraire, arrêtait absolument les rayons ; toutefois, la lumière phosphorescente de l'air le traversait, et la plaque n'était indemne que sous les deux écrans.

23. Vitesse des rayons cathodiques. — La vitesse des rayons émanés de la cathode est un important critérium de leur nature ; elle permet, en effet, de décider s'ils peuvent être considérés comme dus au mouvement de la matière, ou s'il faut abandonner cette hypothèse [1].

Nous avons dit déjà que M. Goldstein avait appliqué la méthode Doppler-Fizeau à leur investigation et n'avait pas pu déceler un mouvement quelconque du gaz luminescent dans le tube. M. Tait avait fait, à la même époque, une constatation analogue. Plus tard, MM. Wiedemann et Ebert trouvèrent que la vitesse des particules lumineuses autour de la cathode ne pouvait pas dépasser 5 kilomètres par seconde [2].

Toutefois, ces expériences ne nous disent rien sur la véritable vitesse des rayons cathodiques. Nous avons vu (**21**) que l'effet lumineux est toujours produit par le choc de ces rayons sur des particules matérielles, ou, plus probablement, par la recombinaison des éléments dissociés par le choc ; on peut donc seulement en conclure que, au moment où elles émettent de la lumière, ces particules ne sont pas douées d'une vitesse considérable.

Les expériences récentes de M. J.-J. Thomson ne sont pas soumises à cette objection [3]. Deux récepteurs luminescents sont disposés respectivement à 15^{cm} et 25^{cm} de la cathode d'un tube cylindrique. Celui-ci est recouvert de

---

(1) Si l'on trouvait, par exemple, une vitesse du rayon égale à celle de la lumière, la nature optique du phénomène deviendrait évidente. Un gramme de matière doué de cette vitesse posséderait une énergie cinétique égale a celle que fournirait un cheval-vapeur travaillant pendant près de 2000 ans, ce que l'on peut difficilement admettre.

(2) E. Wiedemann et H. Ebert, *Ueber electrische Entladungen* (*Annales de Wiedemann*, t. XXXVI, p. 643 ; 1889).

(3) J.-J. Thomson, *On the Velocity of the cathode-rays* (*Philosophical Magazine*, t. XXXVIII, p. 358 ; 1894).

noir de fumée que l'on a enlevé suivant deux lignes parallèles à l'axe du tube, situées au-dessus des récepteurs. Un ensemble de six miroirs tournants fixés sur le même tambour renvoie l'image des fentes dans un objectif de grand diamètre. On a disposé, sur le trajet d'un des faisceaux, un prisme de très faible ouverture qui amène l'image des deux fentes dans le prolongement exact l'une de l'autre. Avec les moyens ordinaires d'excitation du tube, l'image des fentes s'étale beaucoup lorsque le miroir tourne rapidement, de sorte que l'observation perd toute précision.

Le dispositif employé finalement par M. Thomson consiste en une forte bobine fermée sur les armatures extérieures de deux condensateurs dont les armatures intérieures sont réunies par le primaire d'une seconde bobine noyée dans l'huile. Le secondaire de cette bobine donne des étincelles de 20^{cm} environ. Le tube est en verre d'urane.

Dans ces conditions, le premier bord de l'image est parfaitement net, tandis que le second est estompé en raison de la durée de la luminescence. Il convient donc de rapporter les résultats au début de l'effet lumineux. On pourrait objecter à ces mesures que, si l'on observe un intervalle appréciable entre l'apparition des deux images, il peut être dû au fait que la deuxième, produite par une excitation moins intense, atteint plus lentement un éclat perceptible. M. Thomson avait prévu cette objection et s'en était garanti par un examen du phénomène sur lequel nous n'insisterons pas.

La vitesse des rayons cathodiques trouvée par M. J.-J. Thomson est de 200 kilomètres par seconde. Cette vitesse est parfaitement justifiée par le potentiel réciproque de la cathode et d'un atome gazeux qui s'en échappe. Elle est beaucoup plus faible que la vitesse de la décharge elle-même, qui est environ moitié moindre que celle de la lumière,

d'après les mesures faites aussi par le professeur Thomson. On revient ainsi, par une voie nouvelle, à ce principe qui ressort des expériences de Hertz, que les rayons cathodiques, s'ils contribuent à la décharge dans les gaz, n'en forment qu'une partie. La vitesse de 200 kilomètres par seconde est inconnue jusqu'ici pour les perturbations de l'éther; il est donc vraisemblable que, si les rayons cathodiques sont dus à un phénomène de cet ordre, comme le veut la théorie des physiciens allemands, on se trouve en présence d'un principe nouveau.

On peut rattacher à la vitesse des rayons cathodiques la question des modifications que ces rayons font subir à l'éther dans lequel ils se déplacent.

MM. Wiedemann et Ebert ont mesuré l'indice de réfraction d'un espace dans lequel on produisait, par intermittences, des rayons cathodiques; ils ont trouvé que la présence de ces rayons ne modifie pas l'indice et, par conséquent, la vitesse de la lumière d'une quantité supérieure à $\frac{1}{67000}$, limite de la précision de leurs mesures.

24. Convection de l'électricité par les rayons cathodiques. — M. Perrin décrit en ces termes une expérience fort intéressante qui ne laisse aucun doute sur cette convection [1]:

« Les partisans de la théorie de Crookes admettent que les rayons cathodiques sont chargés négativement; à ma connaissance, on n'a pas constaté cette électrisation; j'ai d'abord tenté de vérifier si elle existe, ou non.

» Pour cela, j'ai fait appel aux lois de l'influence, qui permettent de constater l'introduction de charges élec-

---

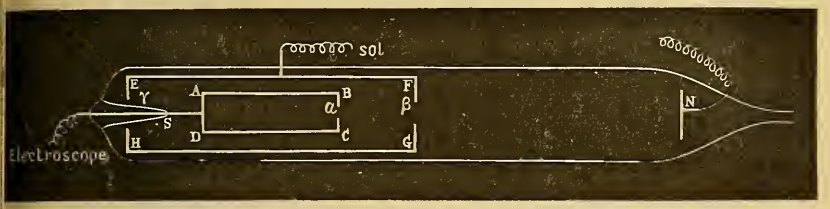
[1] J. Perrin, *Nouvelles propriétés des rayons cathodiques* (*C. R.*, t. CXXI, p. 1130; 1895).

triques à l'intérieur d'une enceinte conductrice close, et de les mesurer. J'ai donc fait pénétrer des rayons cathodiques dans un cylindre de Faraday.

» J'ai employé le tube à vide représenté par la *fig.* 14.

» ABCD est un cylindre métallique fermé de toutes parts, sauf une petite ouverture α au centre de la face BC. C'est lui qui jouera le rôle de cylindre de Faraday. Un fil métal-

Fig. 14.



lique, soudé en S à la paroi du tube, fait communiquer ce cylindre avec un électroscope.

» EFGH est un deuxième cylindre métallique, *en communication permanente avec le sol,* et percé seulement de deux petites ouvertures en β et γ. Il protège le cylindre de Faraday contre toute influence extérieure. Enfin, à 10^{cm} environ en avant de FG, se trouve une électrode N.

» L'électrode N servait de cathode; l'anode était formée par le cylindre protecteur EFGH : un pinceau de rayons cathodiques pénétrait alors dans le cylindre de Faraday. Invariablement, ce cylindre se chargeait d'électricité négative.

» Le tube à vide pouvait être placé entre les pôles d'un électro-aimant. Quand on excitait ce dernier, les rayons cathodiques, déviés, n'entraient plus dans le cylindre de Faraday : alors ce cylindre ne se chargeait pas; il se chargeait aussitôt qu'on cessait d'exciter l'électro-aimant.

» Bref, le cylindre de Faraday se charge négativement quand les rayons cathodiques y pénètrent, et seulement quand ils y pénètrent : *les rayons cathodiques sont donc chargés d'électricité négative.*

» Les rayons cathodiques étant chargés négativement, le principe de la conservation de l'électricité porte à rechercher quelque part les charges positives correspondantes. Je crois les avoir trouvées dans la région même où se forment les rayons cathodiques, et avoir constaté qu'elles cheminent en sens inverse, en se précipitant sur la cathode.

» Pour vérifier cette hypothèse, il suffit d'employer une cathode creuse et percée d'une petite ouverture par laquelle puisse entrer une partie de l'électricité positive attirée. Cette électricité pourra alors agir sur un cylindre de Faraday intérieur à la cathode.

» Le cylindre protecteur EFGH, avec son ouverture β, remplit ces conditions; je l'ai donc employé, cette fois, comme cathode, l'électrode N étant anode. Le cylindre de Faraday s'est alors invariablement chargé d'*électricité positive*. Ainsi, en même temps que de l'électricité négative est *rayonnée* à partir de la cathode, de l'électricité positive chemine vers cette cathode. »

On supprimait aussi l'action au moyen d'un aimant.

La conclusion que M. Perrin tire de cette expérience est que les ions formés au voisinage de la cathode par la rupture des molécules gazeuses jouent le rôle de support de charges électriques qu'ils perdent dans une enceinte dans laquelle ils pénètrent.

CHAPITRE VI.

LES RAYONS X.

25. Analyse du Mémoire de M. Röntgen. — C'est dans une séance désormais mémorable de la Société physico-médicale de Würtzbourg que le professeur Röntgen annonça pour la première fois sa brillante découverte. Le Mémoire provisoire qu'il a publié dans les *Sitzungsberichte* de cette Société a été reproduit *in extenso* dans la plupart des périodiques scientifiques [1]. Nous n'en donnerons ici qu'une courte analyse.

Le point de départ de la découverte de M. Röntgen est l'observation fortuite de la phosphorescence d'une paillette de platinocyanure de baryum au voisinage d'un tube de Hittorf, complètement enfermé dans une enveloppe de carton noir, opaque aux rayons lumineux ordinaires et aux radiations ultra-violettes connues. Les premières expériences ayant montré que l'écran s'illuminait encore, quoique faiblement, derrière un livre de 1000 pages, une planche de bois ou une plaque d'aluminium de 15^{mm} d'épaisseur, il devint évident que l'on se trouvait en pré-

[1] W. Röntgen, *Sitzungsberichte der Würtzburger physikalisch-medicinischen Gesellschaft;* décembre 1895. — *Voir* aussi la *Revue générale des Sciences* du 30 janvier, et le *Journal de Physique* de mars 1896.

sence d'un agent sinon entièrement nouveau, du moins mal connu jusqu'alors. M. Röntgen s'attacha à en reconnaître les principales propriétés. Il trouva d'abord que la densité est un facteur important de l'opacité des corps; toutefois il n'est pas le seul : « On le prouve en employant comme écrans des lames d'égale épaisseur de spath d'Islande, de verre, d'aluminium et de quartz. Le spath d'Islande se montre beaucoup plus transparent que les autres corps, bien qu'il ait approximativement la même densité. Je n'ai pas remarqué, dit le professeur Röntgen, que le spath d'Islande présentât une fluorescence (9) considérable relativement à celle du verre.

» En augmentant l'épaisseur, on augmente la résistance offerte aux rayons par tous les corps.... »

« Des morceaux de platine, de plomb, de zinc et d'aluminium en feuilles ont été préparés de façon à obtenir le même affaiblissement de l'effet. Le Tableau ci-joint donne les épaisseurs relatives et les densités de feuilles de métal équivalentes :

	Épaisseur. mm	Épaisseur relative.	Densité.
Platine.....	0,018	1	21,5
Plomb.....	0,050	3	11,3
Zinc.....	0,100	6	7,1
Aluminium.....	3,500	200	2,6

» Il résulte de ces valeurs que l'opacité n'est pas proportionnelle au produit de la densité par l'épaisseur d'un corps. La transparence augmente beaucoup plus rapidement que le produit ne décroît [1]. »

M. Röntgen a cherché, sans y réussir, à déceler une

[1] Les expériences faites sur l'aluminium et même sur le zinc nous paraissent peu propres à renseigner sur le rôle de la densité, à cause des phénomènes de luminescence que présentent les oxydes de ces métaux. (*Voir* note p. 67 et Chap. IX.)

action calorifique des rayons X; cette action existe évidemment, puisque nous avons affaire à une forme de l'énergie susceptible de se transformer; mais l'énergie des rayons peut être très faible.

L'œil ne perçoit pas ces rayons. M. Röntgen pense que la cause en est dans l'insensibilité de la rétine; nous verrons, toutefois, que les milieux de l'œil sont opaques pour les rayons X, et que, si même la rétine y était sensible, ils resteraient invisibles.

La propriété la plus remarquable des rayons découverte par M. Röntgen est leur propagation tellement rectiligne, qu'il n'est pas parvenu à trouver aucune déviation dans le passage à travers un prisme. Quelques mesures semblent donner un indice plus grand que l'unité, mais l'observation est douteuse. Il est un moyen, sinon précis, du moins très sensible, de mettre en évidence la réfraction à la surface des corps : c'est de diriger le rayon sur une poudre dont chaque grain contribue à la réfraction irrégulière du faisceau et à sa diffusion. Cette diffusion était insensible dans les expériences de M. Röntgen. Le faisceau éprouvait, en traversant une colonne de sel gemme, de zinc ou d'argent pulvérisés, la même absorption qu'au passage d'une masse égale des mêmes solides en morceaux compacts. La même expérience montre que la réflexion à la surface des corps est extrêmement faible.

Il a semblé possible que la disposition géométrique des molécules modifiât l'action qu'exerce un corps sur les rayons X; s'il en était ainsi, le spath d'Islande, par exemple, pourrait présenter des phénomènes différents, suivant l'orientation de la radiation par rapport à l'axe du cristal. Des expériences faites sur le quartz et le spath d'Islande n'ont donné aucun résultat.

M. Röntgen pense que le point d'émission des rayons X

est l'endroit du tube où les rayons cathodiques frappent le verre. A partir de ce point, l'intensité de leur effet diminue, en raison du carré de la distance, l'absorption par l'air étant si faible qu'elle peut être négligée, au moins en première approximation. De plus, on déplace la source des rayons X en agissant, à l'aide d'un aimant sur les rayons cathodiques, de manière à les amener en un autre endroit du tube. On provoque aussi la formation des nouvelles radiations en arrêtant les rayons cathodiques à l'aide d'une plaque d'aluminium.

M. Röntgen ne pense pas que les nouveaux rayons soient identiques à ceux qui émanent de la cathode; ils en diffèrent par plusieurs propriétés importantes, en particulier par leur insensibilité à l'action de l'aimant.

« La déviation des rayons cathodiques par l'aimant est une de leurs caractéristiques spéciales; Hertz et Lenard ont observé qu'il existe plusieurs espèces de rayons cathodiques, qui diffèrent par leur propriété d'exciter la phosphorescence, leur facilité d'absorption et leur degré de déviation par l'aimant; mais on a observé une déviation notable dans tous les cas étudiés, et je pense que cette déviation constitue un caractère qu'on ne peut pas négliger facilement. »

M. Röntgen reconnut ensuite qu'un certain nombre de substances s'illuminent sous l'action des rayons X; puis il étudia leur action photographique. Il put ainsi éliminer mieux les causes d'erreurs.

« J'ai confirmé de la sorte, dit-il, beaucoup d'observations faites d'abord en regardant l'écran fluorescent. C'est ici que la propriété que présentent les rayons X de passer à travers le bois ou le carton devient utile. La plaque pho-

tographique peut être exposée à leur action sans qu'on ait à enlever le volet du châssis, ni aucune boîte protectrice, de sorte que l'opération n'a pas besoin d'être conduite dans l'obscurité. Il est clair que les plaques qui ne sont pas en expérience ne doivent pas être laissées dans leur boîte au voisinage du tube.

» Il resterait à savoir si l'impression sur la plaque est un effet direct des rayons X, ou un résultat secondaire dû à la fluorescence de la matière de la plaque. Des pellicules peuvent être impressionnées aussi bien que les plaques sèches ordinaires. »

Les applications que M. Röntgen a faites le premier de sa découverte sont connues de tous ; il a montré comment on pouvait, par leur moyen, dessiner le profil des parties les plus denses à l'intérieur d'un organisme vivant, projeter l'ombre d'un objet enfermé dans une boîte en bois, déceler les inégalités de structure d'une lame de métal préalablement soumise au laminage.

Nous reviendrons, dans un autre Chapitre, sur les applications de la méthode. Il nous paraît plus intéressant de donner ici l'opinion de M. Röntgen sur la nature même de sa découverte. Après avoir cherché, sans succès, à reproduire, à l'aide de ses rayons, les phénomènes classiques de l'Optique, tels que l'interférence et la polarisation, il abandonna l'idée que les rayons X puissent être de la lumière, et il eut recours à une autre hypothèse. Nous rendons la parole à M. Röntgen :

« Que sont donc ces rayons? Puisque ce ne sont pas des rayons cathodiques, on pourrait supposer, d'après leur faculté de produire la fluorescence et l'action chimique, qu'ils sont dus à la lumière ultra-violette. Un ensemble imposant de preuves est en contradiction avec cette hypo-

thèse. Cette lumière nouvelle possède, en effet, les propriétés suivantes :

» (*a*) Elle ne se réfracte pas en passant de l'air dans l'eau, dans le sulfure de carbone, l'aluminium, le sel gemme, le verre ou le zinc.

» (*b*) Elle ne peut se réfléchir régulièrement à la surface des mêmes corps.

» (*c*) Elle n'est polarisée par aucun des milieux polarisants ordinaires.

» (*d*) Elle est absorbée par les différents corps, surtout en raison de leur densité.

» Ce qui revient à dire que les nouveaux rayons doivent se comporter tout autrement que les rayons visibles ou infra-rouges et les rayons ultra-violets déjà connus. Cela paraît assez invraisemblable pour que j'aie cherché à faire une autre hypothèse.

» Il semble y avoir une sorte de relation entre les nouveaux rayons et les rayons lumineux; tout au moins la production d'ombres, de fluorescence et d'actions chimiques semble l'indiquer. Or, on sait depuis longtemps qu'en outre des vibrations qui rendent compte des phénomènes lumineux, il est possible que des vibrations longitudinales se produisent dans l'éther (**10**); certains physiciens pensent même que ces vibrations doivent exister. Toutefois il faut convenir que leur existence n'a jamais été mise en évidence et que leurs propriétés n'ont pas été établies par l'expérience. Ces nouveaux rayons ne devraient-ils pas être attribués à des ondes longitudinales de l'éther?

» Je dois avouer qu'à mesure que je poursuivais ces recherches, je me suis accoutumé de plus en plus à cette idée et je me permets de l'énoncer, sans me dissimuler que l'hypothèse demande à être établie plus solidement. »

26. Rayons cathodiques et rayons X. — Avant de pousser plus avant l'étude des nouvelles radiations, il nous reste un point à faire ressortir d'une façon nette : c'est la différence essentielle entre les rayons cathodiques et les rayons découverts par M. Röntgen. A première vue, la synthèse des expériences de M. Lenard et de M. Röntgen pourrait laisser subsister quelque doute à cet égard. Nous avons vu, en effet, que les rayons cathodiques possèdent, à des degrés divers, la faculté d'être absorbés par les milieux matériels ou déviés dans le champ magnétique. On peut dès lors se demander s'il n'existe pas des rayons cathodiques ne possédant ces deux propriétés à aucun degré.

S'il en était ainsi, les rayons de Röntgen devraient partir de la cathode, traverser en ligne droite les parois du tube, et continuer à se propager dans la même direction. Or il n'en est rien ; leur point d'émission se déplace sous l'influence de l'aimant, et, si l'on opère avec un tube sphérique, entièrement illuminé, chacun de ses points est un centre d'émission envoyant sa radiation en tous sens.

La loi de diminution avec le carré de la distance, énoncée par M. Röntgen en termes assez vagues (la distance étant indiquée, dans son Mémoire provisoire, *à partir du tube*), a été vérifiée avec plus de précision par d'autres observateurs aidés par des moyens nouveaux. La loi du carré a été retrouvée à partir d'un point précis de la paroi du tube.

Si maintenant nous retournons aux travaux de M. Goldstein et de M. Lenard, nous y verrons partout la trace des nouveaux rayons. On se souvient que M. Goldstein (**19**) avait interprété comme une réflexion diffuse la production du phénomène par l'interposition d'une lame de mica sur le trajet des rayons cathodiques. De son côté, M. Lenard avait séparé nettement par l'expérience le phénomène en

deux radiations distinctes (22), l'une diffusée dans la matière et déviée par l'aimant, l'autre soustraite à ces deux actions.

Si nous ajoutons à cela que M. Lenard, soucieux avant tout de la conservation de ses tubes pour des expériences comparatives, ne les actionnait que pendant des durées limitées à quelques secondes, et qu'il opérait avec une fenêtre de très faibles dimensions, on admettra sans peine que quelques-unes des propriétés des nouveaux rayons dussent lui échapper.

Ce point de vue simplifie singulièrement l'interprétation des phénomènes; les impossibilités que l'on opposait à la théorie matérialiste des rayons cathodiques s'évanouissent d'elles-mêmes si l'on se limite aux phénomènes dans le tube ou au voisinage immédiat de la fenêtre. Nous reviendrons sur cette affirmation, qu'il n'était pas inutile d'énoncer dès maintenant.

Nous considérerons, du reste, la théorie matérialiste des rayons X comme suffisamment opposée à toutes leurs propriétés, pour qu'il ne soit pas nécessaire d'insister sur son peu de fondement.

27. La propagation des rayons X. Réfraction et réflexion. — La propriété physique la plus remarquable des rayons de Röntgen est leur propagation rectiligne. M. Röntgen avait énoncé le fait comme approximativement exact. Il convenait de le vérifier avec précision. C'est ce qu'a fait M. J. Perrin, au laboratoire de l'École Normale, à Paris [1].

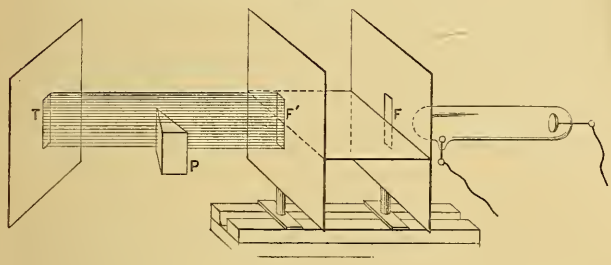
L'appareil (*fig.* 15) consistait essentiellement en deux écrans percés de fentes étroites F, F′, placées parallèlement,

---

[1] La plupart des travaux dont nous parlerons dans la suite ont été insérés aux *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* ou analysés dans *Nature*

et délimitant un pinceau plan et très net de rayons. Le faisceau tombait sur une plaque sensible enfermée dans un châssis. Au développement, on trouva l'image absolument nette de la fente, sans aucune frange de diffraction. En

Fig. 15.



opérant, au contraire, à châssis ouvert, de façon à permettre à la lumière verte du tube de frapper directement la plaque, on releva des lignes d'interférence bien caractérisées.

Ce résultat peut être dû à deux causes distinctes. Il est possible que le phénomène, s'il est périodique de sa nature, soit trop irrégulier pour que des interférences soient susceptibles de se produire, ou bien que la longueur de l'ondulation qui l'engendre soit extrêmement courte.

M. Perrin étudia ensuite, à l'aide du même dispositif, la réfraction à travers des substances diverses; un prisme de la substance à étudier était placé entre la deuxième fente et la plaque. Un écran horizontal séparait les fentes en deux, de manière à éviter les rayons obliques. Dans ces conditions, on trouva l'image des deux demi-fentes T dans le prolongement exact l'une de l'autre lorsque le prisme P était en cire ou en paraffine. Pour quelques métaux, les deux demi-fentes montraient un léger déplacement qui, s'il n'est pas dû à une absorption dissymétrique, conduit

à admettre, pour l'aluminium par exemple, un indice de réfraction égal à 0,9996. La concentration des rayons devrait donc être faite à l'aide de lentilles concaves. Mais l'indice est trop faible pour qu'il puisse y avoir aucun intérêt pratique à cet artifice, l'absorption compensant outre mesure la concentration.

La possibilité de réfléchir les rayons X est fort discutée. M. Röntgen lui-même cite deux expériences qui semblent conduire à des résultats contradictoires. M. Perrin n'a obtenu aucune trace de réflexion sur des miroirs d'acier ou de flint.

Au contraire, MM. Battelli et Garbasso [1], à Pise, MM. Imbert et Bertin-Sans, à Montpellier, pensent pouvoir conclure de leurs expériences que ces rayons éprouvent une sorte de réflexion diffuse lorsqu'ils frappent certains corps; mais aucun de ces observateurs n'est parvenu à mettre en évidence une réflexion régulière sur les miroirs polis. Les premiers plaçaient l'ampoule dans un tube de zinc courbé à angle droit, le coude étant occupé par le miroir. La radiation était reçue par une plaque photographique que l'on trouva impressionnée dans toute la région en regard de l'intérieur du tube.

Les résultats de MM. Imbert et Bertin-Sans varient suivant les corps employés et ne semblent pas être en relation directe avec l'opacité aux rayons X. La réflexion la plus vigoureuse a été obtenue avec une armature d'un condensateur d'Œpinus.

Il nous semble que la phosphorescence a pu jouer, dans toutes ces expériences, un rôle dont il n'est pas encore possible d'apprécier l'importance, mais qui est loin d'être

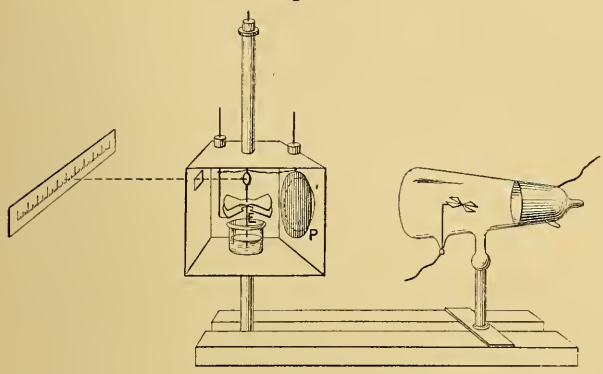
---

[1] A. Battelli et A. Garbasso, *Sopra i raggi del Röntgen* (*Nuovo Cimento* 4e série, t. III, janvier 1896).

nul. Il faudrait, dans toutes les recherches de cette nature, éviter avec le plus grand soin les oxydes métalliques sur le parcours des rayons.

28. Propriétés électriques des rayons X. — MM. Benoist et Hurmuzescu, à Paris, M. Dufour, à Lausanne, M. J.-J. Thomson, à Cambridge, ont successivement annoncé que les rayons X, tombant sur un électroscope, le déchargent rapidement. Les premières expériences ont été faites avec un électroscope à feuilles d'or; cet instru-

Fig. 16.



ment a été remplacé, pour les recherches quantitatives de MM. Benoist et Hurmuzescu, par l'électromètre à deux aiguilles que représente notre *fig.* 16.

Les aiguilles sont enfermées dans une caisse en laiton, que des expériences préliminaires avaient révélé remarquablement opaque pour les radiations de Röntgen. Du côté du tube, la caisse est percée d'une fenêtre circulaire, fermée par une feuille d'aluminium; la face opposée au tube porte une autre fenêtre munie d'une vitre.

L'électromètre est donc dans une cage de Faraday,

empêchant tout accès à l'air électrisé, et fermée électriquement, à l'exception d'une petite surface opposée au tube.

Deux séries distinctes d'expériences peuvent être faites à l'aide de cet instrument. Il conviendra d'abord de rechercher si la rapidité de la décharge dépend de la nature du métal qui reçoit la radiation. Pour cela, on placera, derrière la fenêtre, des plaques épaisses de divers métaux, P, réunies à l'aiguille fixe de l'électromètre E, l'autre aiguille étant à la terre en même temps que la cage.

On étudiera ensuite la transparence des corps en les plaçant, en lames plus ou moins épaisses, devant la fenêtre.

Ce procédé présente, sur la méthode photographique, l'avantage d'être beaucoup plus rapide et d'offrir moins d'arbitraire dans l'interprétation des résultats. Bien que son mécanisme soit encore insuffisamment connu, c'est, pour le moment, la meilleure méthode d'étude quantitative des rayons de Röntgen.

MM. Benoist et Hurmuzescu ont trouvé que, si l'on a soin d'enfermer tout l'appareil, et de soustraire les isolants à des actions extérieures, la décharge de l'électromètre est complète, quel que soit le signe de la charge initiale.

M. Righi, au contraire, pense qu'il reste toujours dans l'électromètre une charge positive. Il nous semble que ses expériences ont pu être faussées par l'action du diélectrique.

Comme MM. Benoist et Hurmuzescu, M. J.-J. Thomson trouve une décharge complète de l'électroscope, quel que soit le signe de la charge. En laissant le tube en communication avec la pompe, il a reconnu que la décharge commence au moment précis où, le vide étant poussé assez loin, on voit apparaître les véritables rayons cathodiques.

Cette action des rayons de Röntgen ne se produit pas

seulement dans l'air; un corps entièrement noyé dans la paraffine, et conservant indéfiniment sa charge dans les circonstances ordinaires, la perd rapidement lorsqu'on envoie un faisceau de rayons Röntgen sur l'isolant.

Deux paires d'électrodes furent noyées dans de la paraffine, formant les quatre angles d'un carré; le bloc étant fixe, ainsi que tout l'appareil, on chargea successivement les deux paires d'électrodes à des potentiels différents; le tout était orienté de telle façon que les rayons traversaient la paraffine parallèlement à la ligne joignant l'une des paires d'électrodes. Dans ces conditions, il n'a pas été possible de déterminer une influence de l'orientation du rayon sur le phénomène.

D'une manière générale, tous les diélectriques semblent devenir conducteurs pendant le passage des rayons Röntgen. M. J.-J. Thomson s'explique nettement sur la cause probable de cette action. Des expériences particulières lui ayant montré que la perte, dans un gaz, est inversement proportionnelle à la racine carrée de sa densité, il en conclut que la décharge est due à l'ionisation du gaz, dissocié par les rayons. Les lois de la dissociation ont, en effet, une allure semblable à celle qui a été trouvée pour la déperdition des charges [1].

M. Thomson a trouvé, en outre, qu'une masse d'air traversée par les rayons X conserve pendant un instant la faculté de décharger les corps électrisés. On le montre en mettant l'électromètre à l'abri des rayons, tandis que l'on dirige sur son récepteur l'air qu'ils traversent.

La symétrie des propriétés des gaz, par rapport aux deux

---

[1] D'après M. Righi, la déperdition diminuerait en même temps que la densité du gaz; les expériences du physicien italien sont donc en contradiction avec celles de M. J.-J. Thomson. La question reste provisoirement ouverte.

électricités, montre bien qu'il s'agit ici d'une modification de la molécule, et non d'une charge électrique. Il serait particulièrement intéressant, à ce point de vue, de répéter l'expérience avec des gaz monoatomiques.

Nous avons rappelé (7) que la lumière ultra-violette traversant un gaz lui communique la propriété de décharger les corps électrisés, en même temps qu'elle produit sa dissociation partielle. Il existe toutefois, entre les deux phénomènes, une différence dont il n'est pas encore possible d'estimer l'importance : les rayons de Röntgen agissent indifféremment sur les deux électricités; la lumière ultra-violette, au contraire, ne semble avoir d'action que sur les charges négatives.

29. Transmission des rayons X. — Les trois réactions caractéristiques des rayons X — actions lumineuses, photographiques et électriques — ont été employées à l'étude de la transmission de ces rayons dans les corps. Chacune des méthodes possède des avantages particuliers. La première donne avec une grande simplicité des résultats qualitatifs. La seconde sera employée avec avantage pour l'étude des lois de la réfraction et de la réflexion des rayons. La troisième, qui est en même temps la plus sensible et la plus propre aux mesures, servira surtout à déterminer les facteurs qui influent sur la transmission des rayons dans les corps, ou, plus généralement, dans tous les cas où les recherches porteront particulièrement sur l'intensité des phénomènes. Cette méthode est d'une application récente, et la plupart des résultats obtenus jusqu'ici ont été trouvés par le procédé photographique.

M. Chabaud a confirmé la grande opacité du platine aux rayons X; il a trouvé que le mercure se comporte d'une façon à peu près identique, tandis que la plupart des

autres métaux présentent une transparence appréciable.

D'après M. Chabaud, les verres à luminescence jaune ou verte sont assez transparents, tandis que le cristal à base de plomb, dont la luminescence est bleue, est doué d'une très grande opacité. Cette propriété suffit pour expliquer le peu d'action des tubes en cristal. Le verre d'urane possède une transparence comprise entre celles du verre ordinaire et du cristal.

M. Meslans a trouvé que le carbone et ses composés sont généralement très transparents; mais l'addition d'un métal ou d'un métalloïde à une molécule organique augmente beaucoup son opacité. On s'explique ainsi pourquoi les chairs sont aisément traversées par les rayons, alors que les os le sont beaucoup moins. La seule différence de densité est, en effet, loin de rendre compte de la différence de transparence entre ces organes.

Il faut toutefois faire exception pour les substances qui composent les milieux de l'œil, si transparents aux rayons du spectre visible. D'après MM. de Rochas et Dariex, ces milieux présentent aux rayons X des opacités diverses, mais assez fortes. On sait, du reste, que l'opacité du cristallin limite seule le spectre visible du côté du violet.

MM. Buguet et Gascard, qui ont fait une étude comparative des diamants vrais ou faux, de jais naturel ou imité, ont trouvé les pierres fausses beaucoup plus opaques que les vraies.

MM. Girard et Bordas ont employé les rayons de Röntgen à révéler la structure d'engins explosibles divers, sans danger pour l'opérateur chargé de cette besogne, particulièrement délicate dans le cas d'appareils secrets; ils ont pu, non seulement découvrir des cavités suspectes dans des objets d'apparence inoffensive, mais encore caractériser, par leur opacité, certains explosifs, tels que les

poudres chloratées, les nitro-celluloses, ou le fulminate de mercure.

Enfin, MM. Batelli et Garbasso, qui ont examiné un grand nombre de corps, ont reconnu, à peu d'exceptions près, que l'ordre des opacités était aussi celui des densités ; mais la première de ces propriétés varie beaucoup plus vite que la seconde. Le cristal, le spath-fluor, le quartz, qui sont très opaques, ne figurent pas dans leur Tableau, dont ils troubleraient certainement l'ordonnance.

C'est dans la poursuite de ces études combinées avec l'examen des diverses radiations de Röntgen que l'on trouvera sans doute les applications pratiques les plus fructueuses de la méthode.

30. Composition des rayons X. — Cette propriété si importante des rayons n'a été que peu étudiée jusqu'ici ; toutefois, les expériences faites avec des tubes différents ou avec le même tube montrent que ces rayons ne possèdent pas tous au même degré le pouvoir de traverser les corps semi-transparents. Ainsi, MM. Benoist et Hurmuzescu ont trouvé, pour un même tube, que la proportion de la radiation transmise par l'aluminium, ramenée à une lame d'aluminium de $0^{mm},1$, variait suivant l'épaisseur d'où elle était déduite, en supposant la loi d'absorption représentée par une seule exponentielle. Ils ont trouvé, pour un même tube, des coefficients de transmission compris entre 0,85 et 0,9, l'unité de longueur étant $0^{mm},1$. Un autre tube a donné un coefficient égal à 0,78. Enfin, M. Röntgen ayant obtenu un effet mesurable au travers d'une plaque d'aluminium de 15^{mm}, il paraît certain que les rayons recueillis derrière la plaque avaient un coefficient de transmission encore plus considérable. En supposant que ce coefficient fût égal à 0,9 pour les

rayons dont parle M. Röntgen, on n'aurait dû retrouver, derrière la plaque, que le dix-millionième environ de la radiation primitive; l'action aurait sans doute été insensible.

MM. Benoist et Hurmuzescu en concluent que les rayons X forment un ensemble hétérogène, comme une sorte de spectre; cette conclusion était probable *a priori*. Il en résulte que les coefficients de transmission ne sont comparables que s'ils se rapportent à des rayons identiques.

Peut-être eût-il mieux valu opérer avec un autre métal que l'aluminium; on aurait été ainsi à l'abri de l'objection que nous avons faite aux expériences sur la réflexion des rayons (**27**).

CHAPITRE VII.

ESSAI DE THÉORIE.

31. Rayons cathodiques. — Nous considérerons maintenant comme suffisamment établi que, dans l'ensemble des phénomènes que nous venons de décrire, les rayons cathodiques jouent simplement le rôle d'excitateurs des rayons X, mais possèdent des propriétés bien distinctes de celles de ces derniers; nous en trouverons de nouvelles preuves au Chapitre IX. Si donc on se borne à étudier la nature du phénomène sans remonter à ses causes, on pourra séparer entièrement la théorie de ces deux espèces de rayons.

Quelques-unes des objections faites à la théorie matérialiste des rayons cathodiques provenaient de ce qu'ils avaient été souvent mélangés de rayons Röntgen. Cela ne paraît pas douteux pour certaines expériences de M. Goldstein et de M. Lenard que nous avons rapportées.

Les faits positifs qui ont conduit à la théorie du bombardement sont suffisamment établis pour que nous n'ayons pas à y revenir. Il nous suffira de réfuter quelques-unes des objections faites à cette théorie.

Nous avons montré déjà (**23**) que les arguments tirés de l'absence d'un déplacement des raies ne conduit pas à admettre qu'il n'y ait pas un mouvement rapide des mo-

lécules au voisinage de la cathode; suivant M. Goldstein, l'effet lumineux ne se produit que lorsque les rayons, primitivement invisibles, rencontrent un obstacle solide (**19**). Hertz a étendu cette idée à une vapeur localisée dans le tube (**21**). Enfin, M. Lenard a montré que la luminescence pouvait aussi se produire dans l'air autour de la fenêtre de l'appareil (**22**). Les solides frappés par les rayons n'effectuent certainement aucun mouvement d'ensemble. Quant aux gaz possédant une densité appréciable à l'endroit où ils absorbent les rayons, ils se comportent suivant les principes de la théorie cinétique. Les premières molécules frappées par les rayons prennent une grande vitesse de translation, qui se répartit, sur un espace très court, entre les molécules voisines.

Hertz avait pensé pouvoir conclure de ses expériences sur l'action électromagnétique que la décharge ne passe pas par les rayons cathodiques. Modifions cette conclusion en disant qu'il se dissipe, par ces rayons, une très petite partie de la charge de la cathode; nous serons alors également d'accord avec le résultat négatif de Hertz et les expériences positives de M. Perrin; ces dernières sont, en effet, seulement qualitatives, et la faible capacité d'un électromètre permet de déceler le transport convectif d'une très petite quantité d'électricité; la charge relativement considérable des ions libres permet de supposer que cette électricité est liée à une quantité de matière prodigieusement petite.

On pourrait objecter aux conclusions de M. Perrin les arguments que fournissent les rayons X eux-mêmes, dont l'action électrique est bien nette ; le changement de la décharge produite par ces rayons en une charge observée par M. Perrin s'expliquerait à la rigueur par une perturbation. Mais alors on ne pourrait plus rendre compte du fait que le phénomène disparaît lorsque, à l'aide d'un ai-

mant, on éloigne les rayons cathodiques de *l'entrée* de la cage.

L'énorme vitesse des rayons ne doit pas surprendre; M. J.-J. Thomson a montré, par un calcul élémentaire, qu'elle résulte des forces très considérables en jeu au voisinage de la cathode, que Hittorf avait déjà reconnu être le pôle privilégié dans tout le phénomène.

D'autre part, il est suffisamment établi que les gaz peuvent être électrolysés, et que, même en dehors de toute action électrique, la lumière ultra-violette provoque leur décomposition et la rupture de la molécule en ions libres. Ce n'est donc plus à la molécule que nous avons affaire, mais bien à l'atome isolé.

La théorie cinétique ne tient pas compte de ce nouvel élément, et le calcul du chemin moyen ne s'y applique pas. Il nous semble donc que l'objection de M. Goldstein, tirée du fait que le rayon cathodique se propage bien au delà de ce que le calcul indique, tombe d'elle-même du moment où l'on substitue l'atome à la molécule.

La même substitution explique la facilité avec laquelle les rayons cathodiques traversent les corps solides; la remarquable proportionnalité entre l'extinction et la masse traversée, sans action sélective, sera une conséquence de l'hypothèse mécanique.

Nous avons vu que, dans un électrolyte liquide, les ions traversent sans résistance appréciable des feuilles minces de métal; ici, la théorie matérialiste semble irréfutable. On accordera dès lors sans peine aux ions tirés de la molécule gazeuse les mêmes propriétés.

N'oublions pas que les atomes formant le support des rayons cathodiques sont animés d'une vitesse de 200 kilomètres par seconde, et que 1 gramme de matière doué de cette vitesse posséderait la même énergie cinétique qu'une

locomotive de plus de 60 tonnes lancée à la vitesse de 80 kilomètres à l'heure. On admettra sans difficulté que ces atomes traversent une feuille de métal imperméable aux molécules possédant seulement la vitesse moyenne que leur assigne la théorie cinétique.

D'où provient cette dissociation des gaz contenus dans le tube ?

On sait, depuis longtemps, qu'il est des tubes de Hittorf récalcitrants, impossibles à actionner seuls, et qui deviennent lumineux sous l'influence d'une autre ampoule. MM. Wiedemann et Ebert ont trouvé aussi que la lumière ultra-violette a une action notable sur l'éclat d'un tube, au début de l'expérience ; cette action va en s'affaiblissant, et, lorsque le tube est en pleine marche, elle cesse complètement.

Ce phénomène s'accorde absolument avec le fait que la lumière ultra-violette ionise les gaz. Un tube est isolant lorsqu'il ne contient pas un nombre suffisant d'ions libres. Dès qu'on en a produit dans son intérieur, la décharge passe, et le même état s'entretient de lui-même soit par la lumière ultra-violette qui existe généralement dans le tube, soit par les rayons de Röntgen; nous savons, en effet, sans préjuger de leur nature, qu'ils produisent l'ionisation des gaz qu'ils traversent.

Il ne nous reste que quelques mots à dire d'une ingénieuse théorie émise par M. Jaumann, avant la découverte de M. Röntgen.

L'idée de M. Jaumann a pour point de départ l'observation qu'il fit, il y a quelques années déjà, d'une sorte de surface d'interférence entre deux cathodes parallèles. Cette surface occupe exactement le plan moyen entre ceux des électrodes négatives lorsque les fils qui y conduisent ont

exactement la même longueur; le phénomène devient, au contraire, diffus si les chemins sont différents. Les dimensions de son appareil conduisent M. Jaumann à attribuer aux rayons une durée d'oscillation de l'ordre du milliardième de seconde.

M. Jaumann part ensuite de l'hypothèse que le pouvoir inducteur spécifique et la perméabilité magnétique de l'espace traversé par des décharges électriques sont variables. Il est ainsi amené à ajouter aux équations de Maxwell des termes qui contiennent les dérivées de ces quantités, et que l'on avait considérés jusqu'ici comme nuls. L'auteur reconnaît que l'on n'a pas réussi à mettre en évidence la variabilité de ces deux propriétés de l'éther; il pense qu'on n'y parviendra que par l'étude de certaines conséquences de cette hypothèse.

L'une des conséquences de cette idée est précisément l'existence d'ondes longitudinales dans les gaz raréfiés soumis aux décharges électriques. Ces ondes seraient de natures diverses, suivant les conditions de leur production, et posséderaient quelques-unes des propriétés des rayons cathodiques. Mais les hypothèses primitives de M. Jaumann ne rendent pas compte de tous les phénomènes. Suivant M. H. Poincaré, les équations de M. Jaumann représentent des rayons qui suivraient les lignes de force et ne seraient pas déviés par l'aimant.

M. Jaumann a cru pouvoir répondre à ces critiques. Mais la discussion revêt un caractère mathématique trop spécial pour qu'il soit possible d'en donner ici l'analyse.

32. Rayons X. — Les trois idées par lesquelles on a cherché à expliquer les rayons cathodiques se retrouvent dans la théorie des rayons X. Si invraisemblable que soit la théorie matérialiste de ce phénomène, on y a encore eu

recours au début des travaux auxquels il a conduit. Nous avons vu que l'on pouvait, en effet, considérer, avec une apparence de vraisemblance, les rayons X comme un cas particulier des rayons cathodiques, possédant un minimum des propriétés qui les caractérisent. L'absence de déviation par l'aimant, vérifiée avec beaucoup de soin par M. Oliver Lodge, s'expliquerait par la décharge complète des particules électrisées traversant le tube de Crookes. Il nous semble, toutefois, que la prodigieuse perméabilité des corps pour ces rayons et l'absence de diffusion opposent un insurmontable obstacle à leur théorie matérialiste.

Les vibrations longitudinales, telles que les a imaginées M. Jaumann, ne s'adaptent pas mieux à plusieurs des propriétés essentielles de ces rayons. Toutefois, cette idée, sous sa forme la plus générale, ne doit pas être rejetée sans examen.

Bien que, dans le Mémoire provisoire de M. Röntgen, l'idée de l'oscillation longitudinale ne soit appuyée d'aucun raisonnement, le seul fait que l'éminent professeur l'a émise comme possédant un certain degré de probabilité, lui donne, en cette occasion, une très grande importance. Comme le dit M. Lodge, « il faut écouter celui qui vit au milieu des phénomènes, parce qu'il peut souvent sentir intuitivement plus qu'il ne pourrait justifier et établir logiquement ». Jusqu'ici nous ne possédons guère que des ébauches de théories de rayons X, basées sur l'hypothèse des ondes longitudinales; on ne peut, en effet, attribuer au milieu dans lequel elles sont engendrées que des propriétés en concordance avec celles du phénomène dont on veut rendre compte; et il faut reconnaître que celui dont nous nous occupons est encore bien mal connu.

M. J.-J. Thomson a montré récemment que les ondes longitudinales peuvent prendre naissance dans un milieu

contenant des ions chargés en mouvement, ou bien aussi dans tout autre milieu dans lequel l'éther se déplace; la longueur des ondes possibles est alors de l'ordre de grandeur des particules matérielles qui se trouvent dans ce milieu. Des ondes de cette espèce ne seraient pas réfractées; mais nous avons vu qu'il en serait de même de toutes les ondes extrêmement courtes.

Nous ne poursuivrons pas davantage l'étude des ondes longitudinales. Il est une opinion, émise pour la première fois par Newton, et qui a été reproduite à diverses reprises, c'est que les ondes de compression de l'éther seraient probablement capables d'expliquer la gravitation et la cohésion, les plus mystérieux de tous les phénomènes naturels. Il serait donc prudent de garder en réserve ces ondes encore inconnues tant que l'on pourra se dispenser de les faire intervenir dans d'autres phénomènes. Le cas des lumières nouvelles ne semble pas encore désespéré.

Quels sont les arguments que l'on oppose à l'idée que les rayons de Röntgen sont dus à des vibrations transversales de très faible longueur d'onde?

En premier lieu, l'absence de réfraction et la transparence surprenante des corps considérés comme les plus opaques à tout mouvement vibratoire.

Mais nous avons vu que la question d'opacité est très relative et semble soustraite à toute loi générale. L'eau est opaque dans l'infra-rouge, l'argent est transparent dans l'ultra-violet, tandis que le verre y est d'une remarquable opacité. Les matières colorantes, telles que la fuchsine ou le rouge de Magdala, présentent une bande d'absorption bien délimitée, à l'intérieur de laquelle elles sont très opaques, pour redevenir transparentes de part et d'autre de cette bande (6). En même temps, l'indice de réfraction subit des variations bien différentes de celles qu'indiquent les lois

ordinaires de la réfraction : augmentation régulière de l'indice vers les faibles longueurs d'onde. Les expériences et les théories connues avant la découverte des nouveaux rayons prennent, à ce point de vue, une très grande importance; sans l'addition d'aucune hypothèse, elles montrent que, pour les très faibles longueurs d'onde, les corps doivent tendre vers la transparence, en même temps que leur indice doit s'approcher de l'unité [1].

Quant à une relation quelconque entre la densité et l'opacité que M. Röntgen avait cru pouvoir déduire de ses premières recherches, elle n'a pas été confirmée par les expériences ultérieures [2]. Sans doute, des corps très denses, comme le platine ou le mercure, restent fortement absorbants, mais cette coïncidence peut n'être que fortuite. Ainsi, les milieux de l'œil, ou les verres à base de plomb dont la densité n'est pas très élevée, sont aussi d'une assez grande opacité. Les actions sélectives, que M. Röntgen avait déjà indiquées, sont peut-être beaucoup plus importantes qu'il ne le pensait.

Cette propriété des corps donne lieu à des vérifications inattendues, si l'on part de l'idée que les rayons X sont dus à des oscillations transversales très rapides.

Le spath-fluor, qui est d'une transparence parfaite dans toute la région du spectre explorée jusqu'ici, présente une grande opacité aux rayons X; or M. Carvallo, appliquant à ce corps les équations de Ketteler, trouve une remarquable concordance entre les résultats des mesures d'indice et ceux du calcul, s'il admet que ce corps possède une

---

(1) Cette remarque a été utilisée pour la première fois par M. C. Raveau dans l'explication du phénomène qui nous occupe.

(2) Nous avons vu, en effet, que certains corps, dont l'opacité s'écarte beaucoup de l'ordre des densités, ne figurent pas dans les Tableaux de MM. Battelli et Garbasso (**29**).

bande d'absorption voisine de la longueur d'onde $0^{\mu},1$ [1].

Sans vouloir, pour le moment, attribuer une importance trop grande aux mesures de M. Perrin, qui, comme nous l'avons indiqué, ont pu être troublées par l'absorption, on remarquera que le sens de l'indice de l'aluminium pour les rayons X concorde avec les prévisions de la théorie pour la lumière ultra-violette.

L'absence d'interférence semble, *a priori,* opposée à l'idée d'un phénomène analogue à ceux de l'Optique. Mais il ne faut pas oublier que les procédés employés pour découvrir ces interférences ne les auraient pas fait apparaître dans le cas de vibrations beaucoup plus rapides que celles avec lesquelles on a opéré jusqu'ici.

Nous avons vu, enfin, que la lumière ultra-violette, comme les rayons X, décharge les corps électrisés, et que, dans l'un et l'autre cas, on peut attribuer le phénomène à l'ionisation du gaz ambiant. Cette analogie, ajoutée aux autres, est d'autant plus importante que cette action est plus singulière. Il existe, sans doute, une certaine différence dans le mode d'action des deux espèces d'énergie, puisque, dans un cas, les corps isolés chargés négativement sont seuls déchargés, alors que, dans l'autre, ils le sont tous indifféremment. Toutefois, il ne faudrait pas s'arrêter à de tels détails, tant que des différences de cette nature resteront isolées. Ces propriétés des radiations pourraient aller en s'accentuant à mesure que les longueurs d'onde se rapprochent des dimensions moléculaires.

N'oublions pas que le mode d'action très différent des

---

[1] E. Carvallo, *Spectres calorifiques* (*Annales de Chimie et de Physique*, 7e série, t. IV; p. 1, 1895). Partant de la formule suivante :

$$n^2 = a + \frac{b}{\lambda^2 - c} + d\lambda^2,$$

M. Carvallo a trouvé $c = +0,0090$, l'unité étant le micron.

ondes infra-rouges, visibles et ultra-violettes avait conduit les anciens physiciens à admettre l'existence de trois espèces distinctes de rayons, et que la première preuve de leur identité a été trouvée dans la coïncidence des raies dans les trois spectres.

Peut-être trouverait-on un argument de plus dans le fait que les rayons X provoquent la *fluorescence ;* mais il ne faudrait pas insister trop sur cette nouvelle coïncidence ; le phénomène est, en effet, infiniment plus compliqué qu'on ne le pensait d'abord.

Quant à l'augmentation de conductibilité de certains corps solides, sous l'action des rayons X, on peut la rapprocher des phénomènes présentés par le sélénium.

Les analogies entre les rayons X et la lumière sont si nombreuses que l'on est tout naturellement conduit à admettre l'identité de principe entre ces radiations qu'un examen superficiel fait paraître si différentes.

On devra maintenant imaginer et réaliser les expériences propres à mettre cette idée à l'épreuve. La répétition des expériences ordinaires de l'Optique avec les nouveaux rayons serait un bon argument en faveur de leur identité avec les vibrations lumineuses. Mais les recherches peuvent être longues et difficiles. Il ne faut pas oublier, en effet, que l'Optique entière s'est échafaudée lentement, et que plus d'une découverte est due à la circonstance fortuite que certains cristaux sont doués de propriétés particulières. Supprimons tel corps de l'ensemble de ceux que nous fournit la nature, on supprimera du même coup la connaissance de tel phénomène important : celui de Hall, par exemple.

CHAPITRE VIII.

APPLICATIONS.

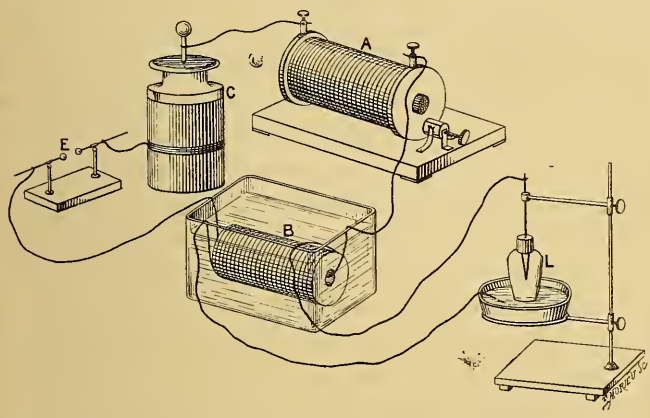
33. Dispositifs d'expérience. — Toutes les expériences récentes sur les tubes à vide ont été faites à l'aide de la bobine d'induction. Nous croyons qu'il vaudrait mieux, pour l'étude des phénomènes, opérer dans des conditions plus simples, et se servir soit de machines statiques à grand débit, soit d'autres sources de courant continu à potentiel élevé. On possède aujourd'hui des machines dynamos à courant direct, donnant une différence de potentiel de 3000 volts aux bornes, ce qui suffit amplement pour exciter les tubes. Nous avons vu que Hittorf et, après lui, Hertz avaient opéré avec des batteries de piles de faible résistance ayant une force électromotrice moindre. Quant à Warren de la Rue et Hugo Müller, ils augmentèrent graduellement leur pile au chlorure d'argent jusqu'à plus de 14000 éléments pour leurs dernières recherches sur les décharges dans les gaz; mais on peut, pour la plupart des expériences, s'en tenir à des proportions plus modestes.

On ne connaît pas encore de règles bien fixes pour l'accouplement des bobines et des tubes; l'idée qui semble dominer aujourd'hui, c'est que l'on obtient de très bons résultats avec des générateurs moins puissants que ceux auxquels on s'est accoutumé, et qui présentent des dangers sérieux pour la conservation des ampoules.

Plusieurs observateurs ont employé avec succès le dispositif de M. Tesla avec deux bobines en cascade. Les effets sont très remarquables, et l'on peut, à l'aide de ce dispositif, réduire beaucoup la durée de l'exposition pour une action photographique déterminée; mais il faut interrompre fréquemment l'opération, sous peine de détruire les tubes.

On peut, toutefois, à l'aide d'un artifice particulier, prolonger l'action indéfiniment dans l'emploi du disposi-

Fig. 17.



tif de Tesla. M. Violle a annoncé que les rayons de Röntgen s'obtenaient facilement par le moyen d'une lampe à incandescence de Gérard ou de Swan, à luminescence verte, dont on actionne la douille, tandis que la pointe de la lampe est reliée à une capacité quelconque ou à un point du circuit. Voici le dispositif ingénieux qu'a imaginé M. d'Arsonval pour utiliser ces propriétés des lampes en connexion avec les courants de Tesla (*fig.* 17). Le courant fourni par une première bobine A est envoyé à l'une des armatures d'un condensateur C; l'autre armature est re-

liée à la bobine par un circuit contenant un intervalle à étincelle E, et le primaire d'une bobine B noyée dans l'huile. Le secondaire de cette bobine est en communication, d'une part, avec la douille d'une lampe Gérard, L, de l'autre, avec une petite capsule en celluloïd remplie d'eau, dans laquelle plonge la pointe de la lampe. On place au-dessous de la capsule le récepteur des rayons X.

34. Prescriptions concernant l'emploi des tubes. — M. Hurmuzescu a trouvé que l'on augmente beaucoup l'action du tube ordinaire en entourant l'extrémité voisine de la cathode d'une feuille d'étain agissant comme un miroir ou comme une capacité additionnelle.

Nous verrons, au Chapitre suivant, que certaines substances phosphorescentes, placées sur le trajet des rayons X, en augmentent l'effet. M. Piltchikoff a, l'un des premiers, obtenu des actions énergiques en plaçant les substances phosphorescentes dans des ampoules. M. Silvanus-P. Thomson recommande de recouvrir la paroi anticathodique d'un émail contenant du sulfure de calcium.

Nous dirons aussi que le professeur J.-S. Mac-Kay, de Brooklyn, a construit un tube fort employé aux États-Unis, et qui semble donner des résultats très remarquables.

Ce tube, d'un diamètre de 20^{mm} à 30^{mm}, et d'une longueur totale de 12^{cm} à 15^{cm}, contient deux électrodes de cuivre en regard, à une distance de 3^{mm} seulement. Le vide a été poussé aussi loin que possible, de telle sorte que l'étincelle passe souvent d'un fil à l'autre par l'extérieur.

Ce tube chauffe très peu, et donne des effets puissants, dont l'origine est dans sa portion moyenne. Il est, du reste, absolument sombre.

Le professeur W. Kœnig, de Francfort, a obtenu des épreuves très remarquables à l'aide d'un tube sphérique

muni d'une cathode concave dont le foyer est au centre de l'ampoule. Les rayons sont interceptés en cet endroit par une lame de platine qui devient la source des rayons de Röntgen. Le foyer est intense et de dimensions très faibles. Le tube peut, sans danger, être actionné par une bobine de Tesla.

Nous avons dit plus haut que les tubes à vide se modifient par l'usage; tantôt ils s'améliorent, tantôt ils se gâtent irrémédiablement. Voici quelques indications sur la manière d'en obtenir un service prolongé. Il convient d'abord de débuter par un courant peu intense, que l'on peut augmenter graduellement; on le contrôlera soit par un galvanomètre dans le circuit primaire, soit par un excitateur à étincelles en dérivation sur le tube. Un tube manié avec précaution commence, en général, par s'améliorer. Au moment où il faiblit, on le ranime en renversant, pendant un instant, le sens de la décharge. Un autre procédé, indiqué par M. Carpentier, consiste à rapprocher l'excitateur à étincelles et à maintenir le tube en dérivation pendant un temps plus ou moins long sur un intervalle d'éclatement restreint, 1^{cm}, par exemple. Au bout d'un moment, on peut écarter de nouveau progressivement les boules et obtenir des effets égaux et même supérieurs à ceux que donnait le tube neuf.

35. La vision directe des rayons X. — Nous croyons que l'étude des propriétés des rayons X et leur utilisation à l'aide d'écrans phosphorescents est limitée à des cas bien définis. On ne pourra en généraliser l'emploi que lorsqu'on possédera des moyens plus puissants de production des rayons, ou des substances plus sensibles à leur action; pour le moment, on devra se borner à la transmission à travers des corps présentant une faible opacité.

M. Swinton annonce qu'il a obtenu, dans cette direction, d'assez bons résultats en modifiant l'écran récepteur recommandé par M. Röntgen. Il prépare une émulsion chaude de platinocyanure de baryum dans de la gélatine dissoute dans l'eau ; puis il étend cette émulsion sur une glace en une couche assez épaisse. La préparation doit faire face au tube.

M. Hospitalier préfère le collodion à la gélatine comme support de la substance luminescente. Pour cette dernière, MM. Battelli et Garbasso recommandent de substituer au platinocyanure de baryum un mélange de sulfure de baryum ou de calcium avec de l'oxyde d'antimoine ; l'action lumineuse est, paraît-il, plus énergique.

Enfin, M. Edison vient d'annoncer, dans un télégramme à Lord Kelvin, que le tungstate de calcium cristallisé constitue un récepteur luminescent extrêmement sensible.

On a fait quelque bruit, ces derniers temps, autour d'un instrument nommé *cryptoscope* par son inventeur, le professeur Salvioni, et qui consiste à placer l'écran récepteur à l'extrémité d'un tube en carton noirci servant à protéger l'œil contre la lumière étrangère. Il n'y a pas là d'invention à proprement parler, et nous ne mentionnons ce dispositif que pour mettre nos lecteurs en garde contre les descriptions aussi diffuses qu'enthousiastes que l'on a données de cet instrument.

36. Applications à la Photographie. — On ne sait pas encore si l'action photographique des rayons X est primaire ou secondaire. M. Röntgen avait déjà cherché à résoudre la question, et avait opéré, comme nous l'avons vu, avec des pellicules, pour éviter la transformation des rayons dans le verre. Mais la gélatine peut être elle-même luminescente, et l'on ne serait mieux fixé qu'en opérant

avec des halogènes sans support. Dans toute la Photographie, le support joue, du reste, un rôle beaucoup plus considérable qu'on ne le croit communément.

Une expérience qui semble confirmer cette opinion, en ce qui concerne les rayons X, est due à MM. Eder et Valenta. Les habiles photographes de Vienne ont trouvé que les plaques au collodion sont très peu sensibles à ces rayons.

M. Albert Londe a constaté que les diverses émulsions se rangent, en ce qui concerne leur sensibilité aux rayons X, dans le même ordre que pour leur sensibilité à la lumière blanche, et ce résultat a été confirmé par MM. A. et L. Lumière. Ils ont montré aussi qu'au bout de dix minutes de pose, les rayons X avaient impressionné 150 feuilles de papier au gélatinobromure. En prolongeant la pose, ils ont impressionné de même 250 feuilles : les papiers sensibles sont à peu près deux fois plus opaques que les mêmes feuilles non recouvertes d'émulsion.

On n'obtient naturellement une grande netteté dans les détails, qu'en diaphragmant l'anticathode ; toutefois, il convient, avant de le faire, de se rendre exactement compte de la distribution d'intensité de la source, pour l'utiliser dans les meilleures conditions possibles. Voici l'ingénieux procédé que préconisent, dans ce but, MM. Imbert et Bertin-Sans : on forme un faisceau de tubes de 6^{mm} à 8^{mm} de diamètre intérieur, dont on applique les extrémités contre la surface du verre. On prend une épreuve du champ éclairé à l'autre extrémité de ces tubes ; l'image se compose alors d'une série de circonférences à l'intérieur desquelles l'impression est uniforme, tandis qu'elle diffère d'un cercle à l'autre. On reconnaît ainsi, d'un seul coup d'œil, les portions de l'ampoule qu'il convient d'utiliser, en satisfaisant le mieux possible aux deux conditions

inverses d'intensité de l'action et de bonne définition des détails. On limitera, à l'aide d'un diaphragme qui n'est pas nécessairement circulaire, la partie la plus brillante de l'anticathode, et l'on placera l'ampoule à une distance de la plaque indiquée par les conditions de netteté et de rapidité auxquelles on se propose de satisfaire.

M. J. Chappuis conseille de n'employer un tube qu'après avoir mesuré son pouvoir actinique à l'aide de l'électromètre; on opère alors à coup sûr avec un temps de pose rigoureusement réglé.

La durée de l'exposition est, du reste, extrêmement variable, suivant les tubes que l'on emploie et les milieux que la radiation traverse. Dans ces derniers temps, plusieurs opérateurs ont obtenu des effets vigoureux avec des durées d'exposition de quelques secondes.

37. Nos épreuves. — Plusieurs opérateurs parmi les plus habiles ont bien voulu mettre à notre disposition les quelques épreuves très caractéristiques que nous reproduisons.

La *fig.* 18, qui montre la radiographie d'un pouce après la résection de la première phalange, est due à MM. Imbert et Bertin-Sans. L'une des épreuves a été obtenue sans diaphragme, l'autre avec un tube muni de son diaphragme. La comparaison des deux épreuves montre bien tout ce qu'on gagne en netteté en limitant convenablement la source.

La *fig.* 19 représente un portefeuille contenant des objets divers. Elle a été exécutée par M. E. Colardeau. Cette épreuve permet de se rendre compte de la transparence presque parfaite du cuir pour les rayons X; le verre du lorgnon est, au contraire, assez opaque, tandis que le crayon que l'on voit au haut de la figure n'a porté qu'une ombre

Fig. 18.

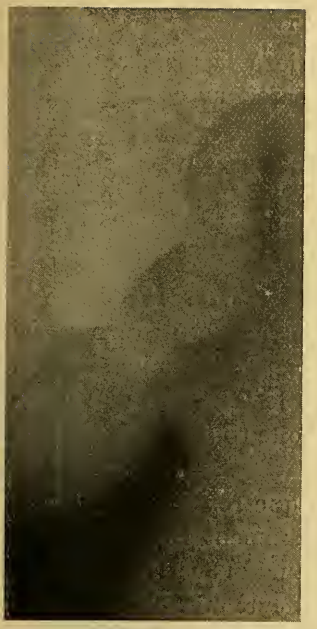


Fig. 19.

très légère, due en grande partie à la plombagine. Le bouton en os qui le termine apparaît avec un peu plus d'intensité.

Nous devons à MM. Benoist et Hurmuzescu le cliché de la planche mise en tête du volume (*Pl. I*). La photographie ordinaire qui accompagne la radiographie indique que nous avons affaire à une boîte ficelée et cachetée, prête à être mise à la poste. Dans la radiographie, les côtés de la boîte ont subsisté seuls avec les ferrures et les cachets. On devine la ficelle qui l'entoure et certaines inégalités du bois. Mais la radiographie nous donne le détail qui sera généralement le plus important : la boîte contient une montre avec sa chaîne.

C'est encore une boîte fermée que représente la *Pl. II*, exécutée d'après un cliché obligeamment prêté par M. Albert Londe, le très habile Directeur du Service photographique de la Salpêtrière. La radiographie nous indique immédiatement que la boîte contient un bracelet. On remarquera la netteté avec laquelle les petits clous qui assemblent la boîte apparaissent dans l'épreuve.

Voici maintenant (*Pl. III*) la classique grenouille, d'après une épreuve de MM. Imbert et Bertin-Sans. Nous attirons l'attention tout particulièrement sur la délicatesse avec laquelle ressortent les moindres détails du squelette, et les gradations de tons dus à la superposition des chairs au voisinage des articulations.

La *Pl. IV* nous dévoile l'anatomie intérieure d'un rat, dont la *Pl. V* donne l'image à la lumière ordinaire. Le poil dont l'animal est recouvert n'oppose pas le moindre obstacle au passage des rayons.

Ces deux épreuves sont dues à M. Londe, ainsi que la suivante (*fig.* 20).

Si nous avons tenu à reproduire cette belle épreuve,

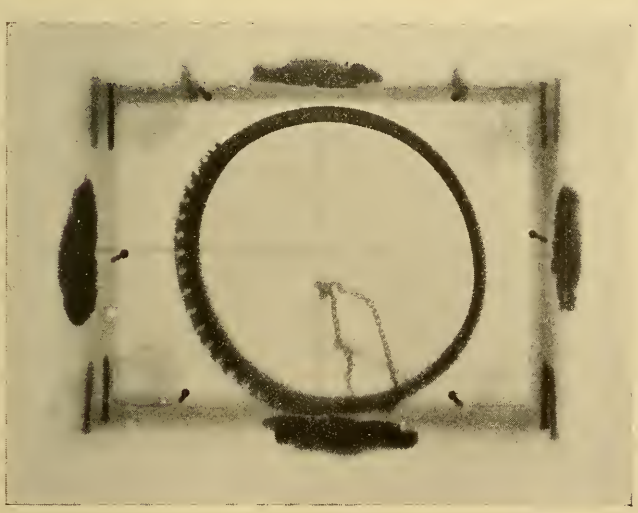
c'est non seulement parce que la radiographie de la main a été un des grands éléments de succès de la première

Fig. 20.

heure pour la méthode du professeur Röntgen, mais parce que nous voyons, dans cette photographie, une application réelle de la méthode au diagnostic d'une lésion interne. On cherchait, par la Photographie, à fixer la position d'une

balle de revolver que l'on savait exister dans la main. L'image radiographique, qui révèle deux ombres nettes entre les métacarpiens, nous indique que la balle s'est partagée en deux morceaux, ce que la palpation n'eût pas permis de soupçonner.

Cet exemple montre bien la nature des indications que la chirurgie pourra tirer de la nouvelle méthode. Déjà, l'on est parvenu à photographier les vertèbres cervicales ou les os du genou d'un être humain, et il y a tout lieu de croire que les plus grandes épaisseurs de notre corps seront bientôt aisément traversées.



BOITE EN BOIS ASSEMBLÉE AVEC DE PETITS CLOUS EN FER.

Photographie à la lumière ordinaire
et radiographie montrant le contenu de la boîte.

Épreuves de M. Albert Londe.

CHAPITRE IX.

PHÉNOMÈNES DIVERS

38. Action de l'effluve. — Nous avons tenu à dégager, dans ce qui précède, la découverte de M. Röntgen et les travaux auxquels elle a donné lieu directement, d'un certain nombre de faits qui semblent avoir une très grande importance, mais à propos desquels les renseignements sont insuffisants ou contradictoires, de telle sorte qu'ils sont encore impropres à corroborer une théorie.

Plusieurs observateurs, Lord Blythswood, M. G. Moreau et d'autres, sont parvenus à obtenir des photographies en remplaçant le tube de Crookes par une effluve électrique produite par la décharge silencieuse d'une bobine ou d'une machine statique [1]. Ils ont ainsi cherché à relier aux découvertes récentes des faits trouvés déjà, il y a une dizaine d'années, par le docteur Boudet de Pâris et M. Tommasi, et auxquels on n'avait accordé alors qu'un intérêt de curiosité. M. Tommasi avait donné à l'agent capable d'exercer une action photographique dans une enveloppe opaque le nom de *rayons électriques;* ce nom était évidemment mal choisi, puisqu'il a aujourd'hui une signification

[1] Lord Blythswood employait, dans ce but, une machine à 128 plateaux de 91cm, consommant plus d'un kilowatt.

bien précise ; il semble cependant que, pratiquement du moins, M. Tommasi était sur la voie de la découverte de M. Röntgen.

39. Rôle de l'anode. — Plusieurs physiciens ont cru pouvoir reporter du côté de l'anode tout le phénomène attribué jusqu'ici au flux d'énergie émané de la cathode. Il est probable que, dans plus d'un cas, l'anode, interceptant les rayons cathodiques dont elle pouvait même occuper le foyer, est devenue un centre d'émission plus important que la paroi du tube.

Voici cependant un fait de nature à soulever un doute sur la rigoureuse exactitude du mécanisme de production des rayons X auquel nous nous sommes habitués. M. Hurmuzescu a observé que, si l'on diaphragme successivement diverses parties de l'anticathode, on recueille les rayons X *dans l'ombre formée par l'anode*. Si la radiation des parties de la paroi éloignées du point que l'on découvre dans l'ouverture du diaphragme a été complètement éliminée, il ne reste plus qu'à admettre qu'on s'était exagéré le rôle des rayons cathodiques dans le phénomène.

Nous verrons, dans le paragraphe suivant, que des radiations assez semblables aux rayons X peuvent avoir une origine absolument différente.

40. La lumière noire. — Une autre découverte, qui peut avoir une importance théorique capitale, est due au docteur Gustave Le Bon ; il a reconnu l'existence de radiations actiniques susceptibles de traverser des plaques métalliques épaisses, dans le flux lumineux d'une lampe à pétrole munie de son verre.

Guidé par une idée théorique manifestement fausse, employant un manuel opératoire qui devait conduire à de

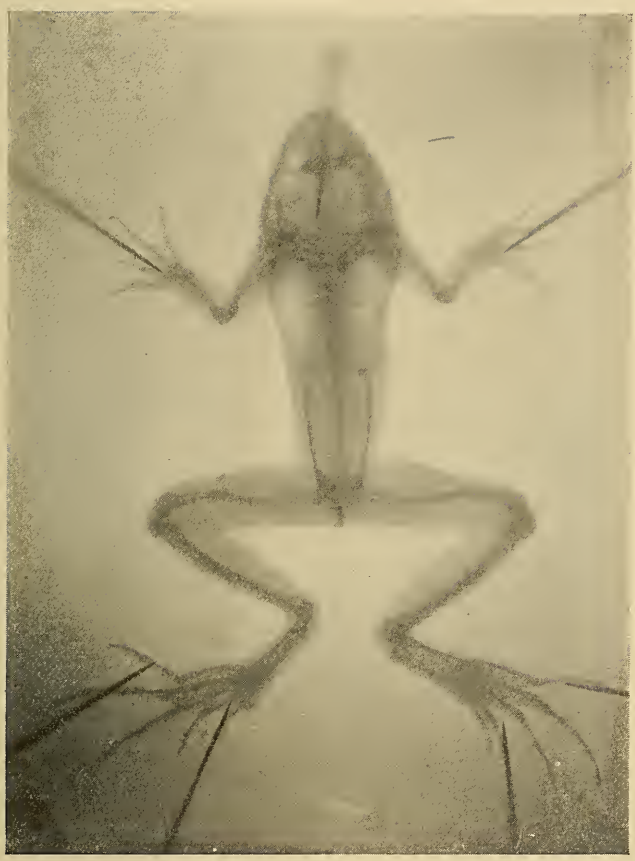


IMAGE RADIOGRAPHIQUE D'UNE GRENOUILLE.

Cliché de MM. Imbert et Bertin-Sans.

fréquents insuccès, M. Le Bon a poursuivi ses expériences avec une grande persévérance, et touchait au but lorsque parut le Mémoire de M. Röntgen. Il ne convenait pas de laisser plus longtemps inconnue une méthode qui présentait, au moins dans ses résultats, une grande analogie avec celle qu'employait le professeur de Würtzbourg. La découverte fut publiée avant d'être au point, et donna lieu à de vives discussions dont les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* contiennent tous les éléments.

Les expériences de M. Le Bon furent répétées par d'habiles opérateurs; M. Nodon, M. G.-H. Niewenglowski, MM. Antoine et Louis Lumière n'obtinrent aucun résultat, alors que M. Murat et le docteur Armaignac confirmaient ceux qu'avait indiqués M. Le Bon.

Le terme de *lumière noire* était évidemment mal choisi, et jetait d'emblée quelque défaveur sur la découverte. De plus, le docteur Le Bon n'en avait pas vu le facteur essentiel, et ainsi s'expliquent les succès divers des expériences de contrôle.

Nous en trouverons tout à l'heure la raison.

41. Les rayons X et la phosphorescence. — M. Charles Henry, à qui l'on doit d'importantes recherches sur la phosphorescence, montra le premier que le sulfure de zinc, placé sur le trajet des rayons X, en augmente l'effet d'une manière assez notable.

Il devenait dès lors particulièrement intéressant de chercher à vérifier une hypothèse émise déjà par M. Poincaré, bien qu'avec une réserve prudente.

« C'est le verre qui émet les rayons Röntgen, et il les émet en devenant fluorescent. Ne peut-on alors se demander si tous les corps dont la fluorescence est suffisamment intense n'émettent pas, outre les rayons lumineux, des

rayons X de Röntgen, *quelle que soit la cause de leur fluorescence?* Les phénomènes ne seraient plus alors liés à une cause électrique. Cela n'est pas très probable, mais cela est possible, et sans doute assez facile à vérifier [1]. »

La vérification a été faite par M. Niewenglowski et par M. Henri Becquerel. Le premier obtint une action sur le papier sensible lorsqu'il plaçait, sur l'enveloppe, du sulfure de calcium exposé à la lumière solaire. Le papier restait inaltéré dans les parties éloignées du corps phosphorescent.

M. Henri Becquerel employa des cristaux de sulfate double d'uranium et de potassium, et trouva aussi qu'une plaque bien enveloppée, exposée à la lumière du soleil, ne présentait des traces de réduction qu'aux endroits qui avaient pu être atteints par les rayons émanés du sel; ceux-ci se sont ainsi montrés susceptibles de traverser le papier opaque aux rayons solaires. M. Becquerel exclut l'hypothèse d'une action chimique directe en interposant, entre le sel et le papier, une mince lame de verre [2].

L'action du corps phosphorescent se prolonge, du reste, bien au delà de sa propre exposition, et même de son émission de rayons visibles. Ainsi, le corps employé par M. Becquerel perd sa lumière visible un centième de seconde après que l'exposition à la lumière excitatrice a cessé; au bout de plusieurs jours de repos, le sel phosphorescent émet des radiations traversant des lames métalliques de faible épaisseur et susceptibles d'impressionner les plaques photographiques. Enfin, les radiations émanées d'un corps phosphorescent provoquent la déperdition de l'électricité.

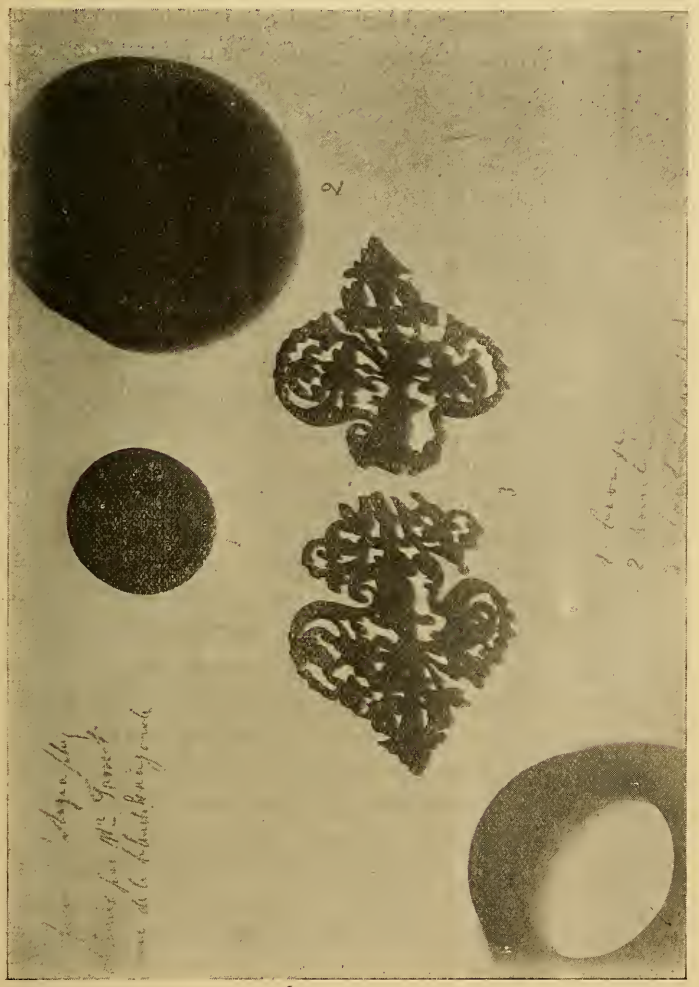
---

(1) *Revue générale des Sciences*, t. VII, p. 54; 30 janvier 1896.

(2) Cette action des corps phosphorescents est de nature à fausser les expériences faites à l'aide de l'aluminium dont l'oxyde devient faiblement lumineux sous l'effet des rayons X (*Voir* note p. 80).

Des constatations analogues ont été faites par M. Troost,

Fig. 21.



avec du sulfure de zinc. La *fig.* 21, qui nous a été très obli-

geamment communiquée par M. Troost, a été obtenue par ce procédé. On avait placé, au fond d'une boîte en carton, une plaque photographique sur laquelle on avait disposé divers objets. La boîte étant fermée, on plaça, sur le couvercle, un cylindre de métal fermé par une lame de verre et contenant de la blende hexagonale que l'on avait impressionnée. Les rayons, partant d'un point situé au centre du couvercle, ont dessiné, sur la plaque, l'ombre des objets suivant leur opacité [1].

Ces expériences contiennent l'explication des résultats contradictoires obtenus par les opérateurs qui ont essayé de vérifier les résultats du docteur Le Bon. Suivant M. d'Arsonval, les expériences ne réussissent que si l'on interpose, entre la source lumineuse et la plaque photographique, une lame de verre susceptible de donner des rayons phosphorescents. Les verres ayant une phosphorescence verte ou jaune donnent en abondance de la lumière traversant les métaux; le verre d'urane est tout à fait remarquable à ce point de vue.

Les radiations émanées des corps phosphorescents ne semblent pas posséder toutes les propriétés des rayons X. Suivant M. Becquerel, ils se réfléchissent, sur les surfaces métalliques et même sur le verre, en une proportion qui n'a pas encore été déterminée, mais qui semble être assez considérable. On sait qu'ils se réfractent, mais on n'a pas de données précises sur leur indice, pas plus que sur la possibilité de reproduire, par leur moyen, les phénomènes ordinaires de l'Optique. Si nous admettons que les rayons X sont dus à des vibrations transversales très rapides, on pourrait penser, avec quelque vraisemblance,

---

[1] M. Troost et M. Becquerel ont constaté ce fait, encore inexpliqué, que la plupart des substances susceptibles d'émettre les radiations nouvelles perdent très rapidement cette propriété.

RADIOGRAPHIE D'UN RAT PAR LES RAYONS DE RÖNTGEN.

Épreuve de M. Albert Londe.

IMAGE D'UN RAT OBTENUE A LA LUMIÈRE ORDINAIRE.

Épreuve de M. Albert Londe.

que les radiations invisibles des corps phosphorescents forment la transition entre elles et les radiations ultra-violettes ordinaires. La réflexion et la réfraction seraient une indication dans ce sens.

L'énergie de ces radiations est sans doute excessivement faible, et l'on ne pourrait pas, sans imprudence, affirmer qu'elles ne sont pas accompagnées d'un changement chimique dans les corps d'où elles émanent. La durée très longue de l'extinction semble bien indiquer une transformation de cette nature. On sait, du reste, que la phosphorescence est très souvent due à des impuretés dont la trace est très difficile à déceler par tous les moyens directs, et que l'on rencontre généralement associées de préférence à certaines espèces chimiques.

Puisque, dans la question qui nous occupe, on en est encore réduit à des hypothèses plus ou moins vraisemblables, on peut se demander si la production des rayons phosphorescents de très faible longueur d'onde est nécessairement liée à une modification chimique. La loi de Stokes semble forcer l'affirmative, et nous avons vu que, dans les conditions où elle est énoncée ordinairement, cette loi apparaît comme une conséquence nécessaire du principe de Carnot. Mais, en l'absence de mesures exactes de l'énergie de la radiation, on est en droit de se demander si toute l'énergie vibratoire incidente se retrouve dans la somme des rayons ayant subi la réflexion épipolique et des rayons non transformés [1].

On peut admettre, sans qu'il y ait aucune contradiction avec le principe de Carnot, qu'une partie de la radiation a été régénérée, une autre dégradée ; cette dernière formera la compensation qu'exige le principe. Et, si la fraction de

---

[1] *Voir* note p. 29.

la radiation dont la fréquence a été augmentée a pris le caractère des rayons X, il n'est pas surprenant qu'elle ait passée inaperçue; ce n'est pas sous cette forme qu'on aurait jamais songé à la chercher. La meilleure preuve qu'elle pouvait échapper pendant longtemps à toutes les investigations nous est fournie par le singulier enchaînement des découvertes dont nous venons de rendre compte.

Les phénomènes fluorescents apparaîtraient alors en Optique comme une analogie nécessaire des sons de combinaison. Le son de différence correspondrait à la radiation dégradée, seule observée jusqu'ici, tandis que le son d'addition serait le nouveau rayon actinique traversant les métaux, que le docteur Le Bon a désigné sous le nom de *lumière noire*.

Cette hypothèse est fort aventureuse; elle ne l'est pas plus cependant que plusieurs parmi celles que l'on a amoncelées autour des radiations nouvelles.

NOTE.

Le prince B. Galitzine et M. de Karnojitzky viennent d'annoncer qu'ils sont parvenus à polariser les rayons de Röntgen et à observer un affaiblissement de l'action après le passage à travers des tourmalines croisées; la direction transversale de l'oscillation est donc nettement établie.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

PRÉFACE V

PREMIÈRE PARTIE.

CHAPITRE I.

L'état gazeux.

1. Théorie cinétique 1
2. La molécule et l'atome 3
3. Les forces moléculaires 7

CHAPITRE II.

La lumière.

4. Le spectre 10
5. Émission et absorption 12
6. La réfraction anomale 14
7. La lumière ultra-violette 20
8. Analogies acoustiques 25
9. Phosphorescence et fluorescence 28
10. Vibrations longitudinales de l'éther 30

CHAPITRE III.

L'électrolyse.

11. Liquides 34

Pages.
12. Solides..... 35
13. Gaz..... 37

SECONDE PARTIE.

CHAPITRE IV.

Les décharges dans les gaz, première période.

14. Phénomènes lumineux dus aux décharges dans les gaz raréfiés..... 41
15. Cas des gaz très raréfiés..... 44
16. Passage de la décharge dans un champ magnétique..... 46
17. Expériences de M. Crookes..... 48
18. Idées de M. Crookes..... 52
19. Expériences de M. Goldstein. Ses objections..... 54

CHAPITRE V.

Les décharges dans les gaz, deuxième période.

20. Coup d'œil sur la théorie des phénomènes..... 60
21. Les actions électromagnétiques et électrostatiques des rayons cathodiques; réciprocité..... 62
22. Les expériences de M. Lenard..... 65
23. Vitesse des rayons cathodiques..... 74
24. Convection de l'électricité par les rayons cathodiques..... 76

CHAPITRE VI.

Les rayons X.

25. Analyse du Mémoire de M. Röntgen..... 79
26. Rayons cathodiques et rayons X..... 85
27. La propagation des rayons X. Réfraction et réflexion..... 86
28. Propriétés électriques des rayons X..... 89
29. Transmission des rayons X..... 92
30. Composition des rayons X..... 94

CHAPITRE VII.

Essai de théorie.

Pages.
31. Rayons cathodiques..... 96
32. Rayons X..... 100

CHAPITRE VIII.

Applications.

33. Dispositifs d'expérience..... 106
34. Prescriptions concernant l'emploi des tubes..... 108
35. La vision directe des rayons X..... 109
36. Applications à la Photographie..... 110
37. Nos épreuves..... 112

CHAPITRE IX.

Phénomènes divers.

38. Action de l'effluve..... 117
39. Rôle de l'anode..... 118
40. La lumière noire..... 118
41. Les rayons X et la phosphorescence..... 119

PLANCHES.

Pl. I. — Photographie et radiographie d'une boîte en bois; épreuves de MM. Benoist et Hurmuzescu. (*frontispice*).
Pl. II. — Photographie et radiographie d'une boîte en bois; épreuves de M. Albert Londe..... p. 116
Pl. III. — Radiographie d'une grenouille; cliché de MM. Imbert et Bertin-Sans..... p. 118
Pl. IV et *V.* — Photographie et radiographie d'un rat; épreuves de M. Albert Londe..... p. 122

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

5214 B. — Paris, Imp. Gauthier-Villars et fils, 55, quai des Gr.-Augustins.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS,
QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 55, A PARIS.

BERTHIER (A.). — Manuel de Photochromie interférentielle. *Procédés de reproduction directe des couleurs.* In-18 jésus, avec 25 figures; 1895 ..... 2 fr. 50 c.

GUILLAUME (Ch.-Ed.), Docteur ès Sciences, attaché au Bureau international des Poids et Mesures. — **Traité pratique de la Thermométrie de précision.** Grand in-8, avec 45 fig. et 4 pl.; 1889 ..... 12 fr.

GUILLAUME (Ch.-Ed.), Docteur ès Sciences, Attaché au Bureau international des Poids et Mesures. — **Unités et étalons.** Petit in-8; 1893.
Broché ..... 2 fr. 50 c. | Cartonné ..... 3 fr.

LA BAUME PLUVINEL (A. de). — Le développement de l'image latente (*Photographie au gélatinobromure d'argent*). In-18 j.; 1889. 2 fr. 50 c.

LONDE (Albert), Officier de l'Instruction publique, membre de la Société française de Photographie, Directeur du service photographique à l'hospice de la Salpêtrière. — **La Photographie moderne.** *Traité pratique de la Photographie et de ses applications à l'industrie et à la Science.* 2e éd. complètement refondue et considérablement augmentée. Grand in-8, avec 345 figures et 5 planches; 1896. Cartonné toile anglaise ..... 15 fr.

LONDE (Albert), Directeur du service photographique à la Salpêtrière. — **La Photographie instantanée théorique et pratique.** 2e édition. In-18 jésus, avec figures; 1890 ..... 2 fr. 75 c.

LONDE. — Traité pratique du développement. Étude raisonnée des divers révélateurs et de leur mode d'emploi. 2e édition. In-18 jésus avec fig. et 4 planches doubles en photocollographie; 1892. 2 fr. 75 c.

LONDE (A.). — La Photographie médicale. *Application aux sciences médicales et physiologiques.* Gr. in-8, avec 80 fig. et 19 pl.; 1893. 9 fr.

VIDAL (Léon). — Manuel du touriste photographe. 2e édition, revue et augmentée. 2 volumes in-18 jésus, avec nombreuses figures, se vendant séparément :

Ire Partie : *Couches sensibles négatives. — Objectifs. — Appareils portatifs. — Obturateurs rapides. — Pose et Photométrie. — Développement et fixage. — Renforçateurs et réducteurs. — Vernissage et retouche des négatifs*; 1889..... 6 fr.

IIe Partie : *Impressions positives aux sels d'argent et de platine. — Retouche et montage des épreuves. — Photographie instantanée. — Appendice indiquant les derniers perfectionnements. — Devis de la première dépense à faire pour l'achat d'un matériel photographique de campagne, et prix-courant des produits les plus usités*; 1889..... 4 fr.

23307 Paris. — Imprimerie GAUTHIER-VILLARS ET FILS quai des Grands-Augustins, 55.

COUNTWAY LIBRARY OF MEDICINE
QC
481
G94

RARE BOOKS DEPARTMENT

A

Harvard University

Library of

The Medical School

and

The School of Public Health

VE RI TAS

The Gift of

Dr. A. U. Desjardins

COUNTWAY LIBRARY OF MEDICINE

QC
481
G94

RARE BOOKS DEPARTMENT